

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE
UM MÓDULO DINÂMICO PARA
SIMULADORES DE ENSINO E TREINAMENTO EM
SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO
PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS**

‘Dissertação submetida como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica’

Alessandro Manzoni

Florianópolis, junho de 1996.

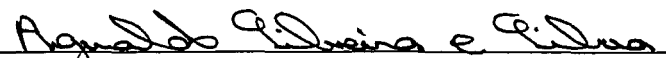
**DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO DINÂMICO PARA
SIMULADORES DE ENSINO E TREINAMENTO EM SISTEMAS
DE ENERGIA ELÉTRICA USANDO PROGRAMAÇÃO
ORIENTADA A OBJETOS**

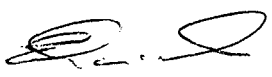
Alessandro Manzoni

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de

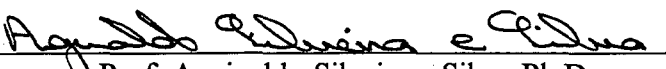
**Mestre em Engenharia Elétrica,
Área de concentração em Sistemas de Potência,**


e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação



Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Orientador

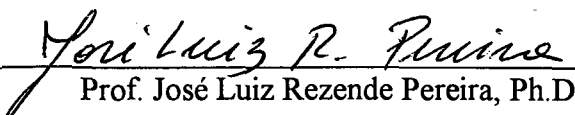

Prof. Enio Valmor Kassick, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora :


Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph.D.
Orientador


Prof. Ildemar Cassana Decker, D.Sc.
Co-orientador


Prof. Luiz Mairo Branco Machado, Dr. Ing.


Prof. José Luiz Rezende Pereira, Ph.D.

*“Os verdadeiros amigos jamais se separam,
apenas trilham caminhos diferentes”*

Ao meu irmão Gustavo (in memorium)

*Dedicada aos meus pais, pelo exemplo de vida
e por proporcionarem as condições
para que aqui chegasse.*

Dedicada à Andrea e Filipe.

Agradecimentos

Aos professores, orientadores e amigos Aguinaldo S. e Silva e Ildemar C. Decker, pela orientação, dedicação e apoio demonstrados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC que, de uma ou de outra forma, contribuíram para a realização deste trabalho, em especial aos professores Aguinaldo, Ildemar, Salgado, Simões e Hans.

Um agradecimento especial ao professor Hans H. Zürn pelo apoio e amizade demonstrada no período em que estive na UFSC.

Ao colega e amigo José Luiz L. de Azevedo, pelo crescimento mútuo que tivemos com as discussões a respeito de nossos trabalhos.

A todos os funcionários, bolsistas, colegas e amigos do mestrado/doutorado pelas horas de convívio dentro e fora da universidade, em especial aos “*colegas de copo e de cruz*” reunidos todas as sextas-feiras no bar IEGA.

Ao CEPEL pela permissão e suporte na utilização do programa ANATEM, particularmente aos engenheiros Xisto Vieira Filho, Nelson Martins, Ricardo D. Rangel e Herminio J.C. Pinto.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

Resumo

Neste trabalho é desenvolvido e implementado um módulo computacional para a simulação da dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica usando Programação Orientada a Objetos. A solução do conjunto de equações algébrico-diferenciais não-lineares que descrevem a dinâmica do sistema é realizada pelo Método Alternado Entrelaçado Implícito. Os modelos utilizados para representar os elementos do sistema permitem a análise da dinâmica de curto (estabilidade transitória) e longo prazo (dinâmica lenta), realizando ambos os estudos em um único módulo computacional. São propostas estruturas de dados orientadas a objetos para representar os elementos do sistema e para armazenar e manipular eficientemente matrizes esparsas. Realizou-se também uma avaliação da viabilidade da utilização desta técnica em aplicações na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Foram realizados testes com sistemas reais de pequeno a grande porte que mostraram ser a modelagem utilizada adequada para simulações de curto e longo prazo, permitindo analisar uma ampla faixa de fenômenos do sistema. O desempenho computacional do módulo implementado foi comparado, sob várias plataformas computacionais, com o do programa ANATEM, desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica) e escrito em FORTRAN. Os resultados mostraram que ambos os programas são comparáveis quanto ao desempenho computacional. Os resultados obtidos, aliado às facilidades de implementação, manutenção e expansão fazem da Programação Orientada a Objetos uma ferramenta viável e adequada para implementações computacionais em Sistemas de Energia Elétrica.

Abstract

This work develops and implements a computational module to simulate power systems dynamics, using Object Oriented Programming. The solution of the nonlinear differential-algebraic equations set, which describes the system dynamics, is carried out by the Implicit Interlaced Alternating Method. The models used to represent the system components allow that the analysis of the short term (transient stability) and long term (slow dynamics) be realized in a single computational module.

An object oriented class structure is proposed to represent the system components and to efficiently store and manipulate sparse matrices. An evaluation of the potential of this approach for power system applications, is presented.

Tests performed on small and large real systems show the adequacy of the proposed models for short and long term simulations, allowing the analysis of a large spectrum of system phenomena.

The computational performance of the implemented module in several platforms is compared with the ANATEM program developed by CEPEL and written in FORTRAN. The results show that both programs are comparable from the point of view of computational performance.

These results, added to the easiness of implementation, maintenance and expansion allowed by the OOP shows the feasibility and adequacy of this approach for the simulation of power systems dynamics, in particular and for power system applications, in general.

Sumário

Resumo	ii
Abstract	iii
Lista de Abreviações	viii
Lista de Símbolos	ix
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
1 Introdução	1
1.1 Histórico e Motivações.....	2
1.2 Aspectos Principais do Trabalho.....	3
1.3 Revisão Bibliográfica.....	4
1.3.1 Simulação da Dinâmica de SEE em Tempo Real.....	5
1.3.2 Aplicações da Programação Orientada a Objetos a SEE.....	5
1.4 Descrição da Estrutura do Trabalho.....	6
2 Simuladores para Sistemas de Energia Elétrica	8
2.1 Gerenciamento de Sistemas de Energia Elétrica.....	9
2.1.1 Centros de Supervisão e Controle.....	10
2.1.2 Simuladores para Ensino e Treinamento.....	12
2.1.2.1 Módulo de Simulação do Sistema de Energia Elétrica.....	13
2.2 Simulação da Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica.....	14
2.2.1 Simuladores da Dinâmica de Curto Prazo.....	16
2.2.2. Simuladores da Dinâmica de Longo Prazo.....	17

2.3	Conclusões	20
3	Formulação Matemática para Simulação de Sistemas de Energia Elétrica	21
3.1	A Simulação de Sistemas de Energia Elétrica.....	22
3.1.1	Formulação Geral do Problema	23
3.1.2	Método de Solução Numérica para as EDOs.....	23
3.1.2.1	Método Trapezoidal Implícito	24
3.1.3	Esquemas de Solução para as Equações do SEE	25
3.1.3.1	Esquema Alternado	25
3.1.3.2	Esquema Simultâneo.....	26
3.2	Esquema Alternado Implícito.....	27
3.2.1	Esquema Geral.....	28
3.2.2	Esquema Alternado Entrelaçado Implícito	30
3.3	Conclusões	31
4	Modelagem dos Elementos do SEE para Simulação	32
4.1	Unidades de Geração.....	33
4.1.1	Máquinas Síncronas.....	35
4.1.2	Regulador de Tensão.....	36
4.1.3	Estabilizador de Sistemas de Potência - ESP.....	37
4.1.4	Regulador de Velocidade.....	37
4.1.5	Turbinas	38
4.1.6	Caldeiras	39
4.1.7	Reator Nuclear	39
4.2	Modelagem dos Elementos da Rede Elétrica	40
4.3	Modelagem das Cargas	41
4.4	Equipamentos FACTS.....	42
4.5	Controle Automático de Geração (CAG).....	42
4.6	Conclusões	43
5	Estrutura Computacional Orientada a Objetos	44
5.1	Programação Orientada a Objetos.....	45
5.1.1	Conceitos Básicos.....	46
5.1.1.1	Listas Encadeadas e Alocação Dinâmica de Memória.....	46

5.1.1.2 Encapsulação de Dados e Mensagens	47
5.1.1.3 Objetos, Classes, Mensagens e Métodos	47
5.1.1.4 Polimorfismo e Herança.....	48
5.1.1.5 Abstração de Dados.....	48
5.2 Modelagem Orientada a Objetos dos Elementos do SEE	49
5.2.1 Barra.....	50
5.2.1.1 Conexões à Rede Elétrica.....	51
5.2.1.2 Conexões aos demais Elementos	52
5.2.2 Ramos	53
5.2.2.1 Elementos Série.....	54
5.2.3 Cargas	55
5.2.4 Unidades de Geração	57
5.2.4.1 Máquinas Síncronas	59
5.2.4.2 Regulador de Tensão.....	60
5.2.4.3 Outros Elementos da Unidade de Geração.....	60
5.2.5 Equipamentos FACTS	61
5.2.5.1 Sistema de Compensação Reativa - SCR.....	62
5.2.5.2 Sinal Adicional.....	62
5.2.5.3 Elementos de Conexão.....	63
5.2.6 Controle Automático de Geração.....	63
5.3 Solução das Equações da Rede Elétrica	64
5.3.1 Armazenamento e Montagem da Matriz.....	65
5.3.2 Fatoração LU	67
5.3.3 Substituição Direta-Inversa.....	70
5.4 Outras Estruturas Orientadas a Objetos Utilizadas	71
5.4.1 Eventos.....	71
5.4.2 Armazenagem e Apresentação dos Resultados.....	72
5.4 Conclusões	72
6 Resultados de Simulações e Avaliação do Desempenho Computacional	74
6.1 Resultados de Simulações de Curto e Longo Prazo	75
6.1.1 Descrições do SEE utilizado.....	76

6.1.2	Simulações de Curto Prazo	77
6.1.2.1	TESTE A : Simulação de Curto Circuito	77
6.1.3	Simulações de Longo Prazo	78
6.1.3.1	TESTE B : Simulação para Uma Curva de Carga no SEE	79
6.1.3.2	TESTE C : Simulação de Ilhamento de uma Área no SEE	81
6.1.3.3	TESTE D : Simulação de Ilhamento de uma Área no SEE	83
6.1.3.4	Teste E : Simulação de Instabilidade de Tensão no SEE	85
6.1.4	Comentários Gerais sobre as Simulações Realizadas	86
6.2	Resultados de Desempenho Computacional	87
6.2.1	Descrições dos SEE Utilizados	88
6.2.2	Descrição das Plataformas Computacionais Utilizadas	89
6.2.3	Comparação de Desempenho com o Programa ANATEM	90
6.2.3.1	Desempenho das Otimizações de Compilador	93
6.2.3.2	Avaliação Geral dos Resultados	95
6.2.4	Desempenho Computacional em Simulações de Curto Prazo	96
6.2.5	Desempenho Computacional em Simulações de Longo Prazo	98
6.2.5.1	Variação Automática do Passo de Integração	100
6.2.6	Análise de Desempenho entre a Modelagem para Simulações de Curto Prazo e a Modelagem para Simulações de Longo Prazo	102
6.3	Conclusões	106
7	Conclusões	108
7.1	Sugestões para Futuros Trabalhos	111
	Bibliografia	112
	Apêndices	121
	Apêndice A - Modelagem dos Elementos do SEE para Simulação	121
	Apêndice B - Aplicação da Regra Trapezoidal as Equações Diferenciais das Máquinas Síncronas	180
	Apêndice C - Aplicação da Regra Trapezoidal aos Elementos Base para a Construção dos Controladores	189
	Glossário de Símbolos	206

Lista de Abreviações

<i>SEE</i>	: Sistema de Energia Elétrica;
<i>COS</i>	: Centro de Operação do Sistema;
<i>CAG</i>	: Controle Automático de Geração;
<i>SCADA</i>	: “ <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> ”;
<i>FACTS</i>	: “ <i>Flexible AC Transmission Systems</i> ”;
<i>EPRI</i>	: “ <i>Electric Power Research Institute</i> ”;
<i>EDO</i>	: Equação Diferencial Ordinária;
<i>EA</i>	: Equação Algébrica;
<i>ESP</i>	: Estabilizador de Sistemas de Potência;
<i>PWR</i>	: “ <i>Pressurized Water Reactor</i> ”;
<i>BWR</i>	: “ <i>Boiling Water Reactor</i> ”;
<i>LT</i>	: Linha de Transmissão;
<i>LTC</i>	: “ <i>Load Tap Changing</i> ”;
<i>POO</i>	: Programação Orientada a Objetos;
<i>PI</i>	: Proporcional - Integral;
<i>PID</i>	: Proporcional - Integral - Derivativo;
<i>SCR</i>	: Sistema de Compensação de Reativos;
<i>CER</i>	: Compensador Estático de Reativos;
<i>CSC</i>	: Capacitor Série Controlado;
<i>RCT</i>	: Reator Controlado por Tiristor.

Lista de Símbolos

- f : vetor de funções não-lineares que definem as equações diferenciais;
- g : vetor de funções não-lineares que definem as equações algébricas;
- x : vetor das variáveis de estado;
- z : vetor das variáveis algébricas;
- u : vetor de variáveis algébricas que aparecem nas equações diferenciais;
- h : vetor de funções não-lineares que descrevem as variáveis u ;
- I : vetor de injeções de correntes nodais do sistema;
- E : subvetor de x ;
- V, V^e : vetor das tensões nodais do sistema na forma complexa e expandida, respectivamente;
- Y, Y^e : matriz admitância nodal na forma complexa e expandida, respectivamente;
- F : vetor de funções algébricas a diferenças não-lineares, resultante da discretização das equações diferenciais dos elementos dinâmicos do SEE;
- G : vetor de funções algébricas não-lineares que representa as equações da rede elétrica e parcelas dos elementos dinâmicos que podem ser formuladas algebricamente;
- H : vetor de funções algébricas não lineares composto da união dos vetores F e G ;
- j : operador imaginário;
- s : operador diferencial no domínio da frequência;
- Δt : passo de integração;
- t_o, t_f : tempo no início do intervalo de integração e no final deste, respectivamente.

Lista de Figuras

2.1 - Configuração dos COSs em um SEE interligado	9
2.2 - Representação das constantes de tempo dos elementos de um SEE	16
4.1 - Unidade de Geração	33
5.1 - Estrutura comumente utilizada em aplicações de POO	50
5.2 - Estrutura proposta para representar o SEE	50
5.3 - Mecanismos de Conexões das Barras	51
5.4 - Conectividade da Rede Elétrica	54
5.5 - Estrutura computacional definida para os transformadores LTCs	55
5.6 - Representação da Unidade de Geração	57
5.7 - Estrutura de descendência para os modelos de máquinas síncronas	59
5.8 - Estrutura computacional dos equipamentos FACTS	61
5.9 - Estrutura de descendência para os modelos de FACTS	62
5.10 - Estrutura computacional do Controle Automático de Geração	64
5.11 - Estrutura da Matriz Esparsa	66
5.12 - Seqüência de Operações durante a Fatoração LU da Matriz	68-69
5.13 - Estrutura resultante após a eliminação de uma coluna da Matriz	70
5.14 - Estrutura de Conexão das Barras à matriz admitância nodal	71
6.1 - Diagrama Unifilar do SEE teste utilizado	76
6.2 - Ângulos das Máquinas Síncronas - TESTE A	78
6.3 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas - TESTE A	78
6.4 - Tensão de Campo das Máquinas Síncronas - TESTE A	78
6.5 - Tensão nas Barras Terminais das Máquinas Síncronas - TESTE A	78
6.6- Ângulos das Máquinas Síncronas - TESTE B	80

6.7 - Carga Ativa das Barras da Área 2 - TESTE B	80
6.8 - Potência Mecânica das Máquinas Síncronas - TESTE B	80
6.9 - Pressão do Vapor das Caldeiras - TESTE B	80
6.10 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas - TESTE B	80
6.11 - Frequência Média do SEE - TESTE B	80
6.12 - Intercâmbio entre as Áreas 1 e 2 - TESTE B	81
6.13 - Erro de Controle de Área - TESTE B	81
6.14 - Ângulos das Máquinas Síncronas - TESTE C	82
6.15 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas - TESTE C	82
6.16 - Potência Mecânica das Máquinas Síncronas - TESTE C	82
6.17 - Pressão do Vapor das Caldeiras - TESTE C	82
6.18 - Frequência Média das Ilhas Elétricas - TESTE C	83
6.19 - Erro de Controle de Área - TESTE C	83
6.20 - Ângulos das Máquinas Síncronas - TESTE D	84
6.21 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas - TESTE D	84
6.22 - Potência Mecânica das Máquinas Síncronas - TESTE D	84
6.23 - Pressão do Vapor das Caldeiras - TESTE D	84
6.24 - Frequência Média das Ilhas Elétricas - TESTE D	84
6.25 - Erro de Controle de Área - TESTE D	84
6.26 - Ângulos das Máquinas Síncronas - TESTE E	86
6.27 - Tensão das Barras do SEE - TESTE E	86
6.28 - Comparação de Desempenho entre os Programas ANATEM-SIMSP	92
6.29 - Comparação de Desempenho entre os Programas ANATEM-SIMSP	92
6.30 - Ganho de Desempenho devido às Otimizações de Compilação	94
6.31 - Desempenho para Simulações de Curta Duração	98
6.32 - Desempenho para Simulações de Longo Prazo	99
6.33 - Composição dos Tempos de CPU para Simulações de Curto e Longo Prazo	104
6.34 - Desempenho dos Computadores com o Crescimento do Tempo Simulado	105

Lista de Tabelas

6.1 - Tempos de CPU para as Simulações Realizadas	87
6.2 - SEE Utilizados para a Análise de Performance Computacional	88
6.3 - Comparação entre os Tempos de CPU para os Programas SIMSP-ANATEM	91
6.4 - Desempenho das Otimizações de Compilação para a Plataforma INTEL	93
6.5 - Desempenho das Otimizações de Compilação para as Demais Plataformas	94
6.6 - Desempenho das Operações Elementares em FORTRAN e C++	96
6.7 - Tempo de Processamento para as Simulações de Curto Prazo	97
6.8 - Tempo de Processamento para as Simulações de Longo Prazo	99
6.9 - Desempenho das Estratégias de Variação Automática do Passo de Integração	102
6.10 - Desempenho Computacional para a Modelagem Convencional x Sofisticada	104

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um módulo computacional de simulação da dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica (SEE) para simuladores de ensino e treinamento. Para este fim, será utilizada a metodologia da Programação Orientada a Objetos (POO) nas implementações computacionais.

A análise do comportamento dinâmico dos SEE frente a perturbações tem sido realizada, ao longo das últimas décadas, através de simulações em computadores digitais. Paralelamente ao rápido desenvolvimento dos SEE, com conseqüente aumento da dimensão e complexidade, tem ocorrido um também rápido desenvolvimento da tecnologia em “*hardware*” e “*software*” disponíveis. No atual estágio de desenvolvimento desta tecnologia é possível simular o comportamento de grandes SEE em reduzidos períodos de tempo, se comparados com a tecnologia disponível há alguns anos atrás. A medida que os computadores evoluíram, foi possível disponibilizar ferramentas mais elaboradas para o apoio da operação, planejamento e, mais recentemente, treinamento do quadro de operadores das empresas do setor elétrico. Dentre estas ferramentas, as de treinamento para operadores são de interesse atual para as empresas do setor elétrico, uma vez que submetem os operadores a diversas situações de emergência sem risco algum para o SEE real.

O crescimento considerável da dimensão dos problemas associados à SEE aliado ao

aparecimento de novas metodologias de programação computacional intensificaram a utilização destas metodologias na área de SEE, uma vez que facilitam a tarefa da programação durante as fases de desenvolvimento, atualização e expansão de programas de grande porte. Dentre estas técnicas destaca-se a Programação Orientada a Objetos como uma alternativa para o desenvolvimento de programas de grande porte.

Neste contexto enquadra-se o tema principal deste trabalho, ou seja, o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para a simulação da dinâmica de SEE utilizando técnicas de programação orientada a objetos.

1.1. Histórico e Motivações

A partir da última década houve um crescente interesse pela simulação do comportamento dinâmico dos SEE por um período de tempo maior que o usualmente utilizado nas simulações até então realizadas. A justificativa para este interesse está baseada no aparecimento de fenômenos no SEE, como grandes excursões na frequência e/ou tensão, que podem provocar certas violações a restrições de operação ou mesmo conduzir o SEE ao colapso total. Tais fenômenos não são detectáveis nas simulações convencionais devido a faixa de tempo onde usualmente ocorrem. Além disso, programas para simulações de longa duração são particularmente atrativos uma vez que podem ser utilizados como base para o desenvolvimento de simuladores para ensino e treinamento.

Assim, o Laboratório de Sistemas de Potência do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSPOT/EEL/UFSC) tem desenvolvido, ao longo dos últimos anos, um sistema computacional de grande porte para a simulação de SEE. Este sistema representa os esforços de vários pesquisadores no sentido de implementar uma ferramenta computacional para auxiliar, em tempo real, a operação e o treinamento de operadores das empresas do setor elétrico. Em seu estado atual de desenvolvimento o simulador implementado conta com várias facilidades quanto a interface gráfica homem-máquina, bem como ferramentas computacionais para o auxílio na operação do SEE. No entanto, o núcleo de simulação do programa utiliza uma metodologia estática para a abordagem do problema. Esta metodologia, apesar de funcional, não é adequada para este tipo de simulador. Recentemente foram realizados alguns esforços no sentido de desenvolver um módulo de simulação da dinâmica, constituindo uma dissertação de mestrado [1]. O trabalho citado foi um primeiro passo na im-

plementação do módulo dinâmico para o simulador. Algumas características do módulo implementado em [1] podem ser destacadas :

- Utiliza a POO nas implementações computacionais.
- Propõe uma primeira estrutura computacional orientada a objetos para aplicação em simuladores da dinâmica de SEE.
- Utiliza modelos simplificados dos elementos do SEE, e específicos para os fenômenos denominados de dinâmica lenta.

1.2. Aspectos Principais do Trabalho

O presente trabalho representa um segundo passo na implementação do módulo dinâmico do simulador do LABSPOT e faz parte de um trabalho conjunto dos Laboratórios de Sistemas de Potência e de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica da UFSC (LABSPOT e LABPLAN, respectivamente).

O módulo computacional implementado deve possibilitar a realização de simulações de longa duração, fundamentais para um simulador de ensino e treinamento. Paralelamente a este objetivo, também é proposta deste trabalho analisar a viabilidade da utilização da POO para aplicações em SEE. A seguir são apresentados os objetivos específicos deste trabalho :

- Implementar um programa para a simulação da dinâmica de SEE, capaz de realizar simulações de longa duração.
- Realizar uma revisão bibliográfica, e posterior documentação, da modelagem atualmente utilizada em simulações da dinâmica de SEE, dando ênfase aos equipamentos não usualmente representados nos estudos convencionais.
- Realizar uma revisão das metodologias de solução do conjunto de equações algébrico-diferencial que descrevem o comportamento dinâmico dos SEE, a fim de determinar a metodologia mais adequada às proposições do trabalho.
- Utilizar a metodologia da programação orientada a objetos e a linguagem C++ para as implementações computacionais.
- Realizar uma análise da viabilidade da aplicação da programação orientada a objetos ao problema da simulação da dinâmica de SEE, considerando para isso a flexibilidade, modularidade e, principalmente, o desempenho computacional do programa implementado.

- Comparar o desempenho do programa implementado ao desempenho de programas comerciais da área.
- Adaptar o programa computacional resultante para várias plataformas computacionais.
- Analisar o desempenho do programa desenvolvido sob esta nova metodologia de programação para várias arquiteturas e ambientes computacionais.

1.3. Revisão Bibliográfica

O desenvolvimento da tecnologia em “*hardware*” e “*software*”, possibilitando a simulação da dinâmica de SEE por longos períodos de tempo em reduzidos tempos de CPU, tem motivado os pesquisadores, principalmente a partir da última década, para a implementação de simuladores de longo prazo. Em 1984, Hemmaplardh e Lamont apresentam em [3] o “*status*” da época para simulações de longa duração. Manke et alli, em [39], propõem critérios e recomendam diretrizes para a implementação de programas de simulação da dinâmica de SEE por longos períodos de tempo, constituindo um relatório do “*Electric Power Research Institute - EPRI*”. Em [4] Jardim e Vieira Filho apresentam algumas perspectivas para simulações de longo prazo no sistema elétrico brasileiro. Neste artigo são reavaliados alguns requisitos para simuladores de longo prazo.

Quanto a modelagem, os trabalhos propostos na literatura, referentes a simuladores de longo prazo, dividem-se em três categorias básicas. A primeira utiliza modelos simplificados para representar os elementos do sistema durante todo o horizonte de simulação [1,5,6,7,8]. A segunda utiliza modelos detalhados para representar os elementos durante todo o horizonte de simulação [9,10,11]. Por fim, a última utiliza modelos detalhados para os fenômenos transitórios, realizando um chaveamento para modelos simplificados após o amortecimento das oscilações eletromecânicas do SEE. Nesta linha destacam-se os trabalhos de Froud et alli em [12] e Baratella et alli em [13] e [14]. Em 1992, de Mello et alli propuseram, em [15], a unificação das simulações tradicionais de curto prazo e das simulações de longo prazo através da simples variação do passo de integração durante a solução das equações diferenciais do SEE.

Paralelamente ao desenvolvimento dos simuladores de longo prazo, evoluíram também os simuladores para ensino e treinamento, onde além da simulação da dinâmica é incorporado um ambiente completo de simulação de SEE. No ambiente de simulação estão disponíveis tam-

bém outros programas aplicativos para análise de SEE, além de uma elaborada interface gráfica homem-máquina. Nesta linha de pesquisa destacam-se os trabalhos de Prais et alli em [7,8], Podmore et alli [9], Foley et alli [16] e os trabalhos [6,10,11,17].

1.3.1. Simulação da Dinâmica de SEE em Tempo Real

Simuladores para ensino e treinamento exigem, como um critério básico, a simulação da dinâmica do SEE com tempos de CPU inferiores ao tempo de dinâmica simulada (simulação em tempo real). A evolução tecnológica dos computadores tem tornado possível este requisito. Assim, citam-se alguns trabalhos registrados na literatura onde o objetivo da simulação em tempo real foi alcançado, obviamente para uma determinada dimensão de SEE.

Sekine et alli apresentam em [18] o panorama atual e perspectivas futuras para simulações com tempo de CPU inferior ao tempo de dinâmica simulada para várias aplicações em SEE. Em 1982, Taoka et alli apresentam em [19] um simulador para um computador massivamente paralelo Ncube2 com 512 processadores, conseguindo simulações em tempo real para um SEE com até 103 barras. A relação de desempenho (tempo de CPU / tempo de dinâmica simulada) para este sistema foi de 0.5, utilizando modelagem detalhada para os elementos do SEE.

Mais recentemente Kyuwa et alli apresentam em [20] um simulador para ensino e treinamento com análise de estabilidade transitória, conseguindo simulação em tempo real para um sistema com 400 barras em um computador paralelo TOSBAC-G8090 com 4 processadores. A relação de desempenho para este sistema foi de 0.75. Baratella et alli apresentam em [13] e [14] um simulador que consegue uma relação de desempenho de 1.0 para um SEE com 710 barras [13] subindo para 3.5 quando a dimensão do SEE aumenta para 1500 barras [14]. Estes resultados, entretanto, são obtidos com a utilização de modelagem simplificada para representar os elementos do SEE, utilizando modelagem detalhada as relações de desempenho sobem para 29 para o SEE com 710 barras e 100 para o SEE com 1500 barras.

1.3.2. Aplicações da Programação Orientada a Objetos a SEE

As aplicações da POO a SEE registradas na literatura são bastante reduzidas. Estas aplicações, basicamente, resumem-se a programas de fluxo de carga e aplicações gráficas para interface homem-máquina. A seguir são citados os principais trabalhos encontrados na literatura.

Em 1990 Neyer et alli [21] aplicaram técnicas de programação orientada a objetos ao problema do fluxo de carga, onde são avaliadas as potencialidades da POO para aplicações a SEE. Registram-se neste trabalho problemas relativos ao desempenho computacional do programa implementado. Posteriormente, Foley et alli apresentam em [22] uma interface homem-máquina utilizando a POO para aplicações gráficas em SEE. Neste trabalho é proposta uma estrutura hierárquica para os elementos baseada no número de nós que compõem o elemento.

Hakavik et alli em [2] propuseram uma nova estrutura hierárquica para os elementos do SEE e avaliaram a viabilidade da utilização da POO para manipulações de matrizes esparsas, sendo relatados problemas de performance computacional em função da manutenção da flexibilidade computacional do programa. Os autores mostraram que a POO não causa necessariamente aumento do tempo computacional.

Vanti em [1] utiliza a POO para o desenvolvimento de um módulo de simulação da dinâmica de SEE utilizando modelagem simplificada para os elementos do SEE e uma estrutura hierárquica derivada de [2] para os elementos do SEE.

Zhou em [23] aplica a POO para um programa de fluxo de carga relatando um bom desempenho computacional para estas aplicações. Foi apresentada também a aplicação dos conceitos da POO para manipulações matriciais.

1.4. Descrição da Estrutura do Trabalho

A seguir apresenta-se a organização deste trabalho :

No capítulo 2, descrevem-se as características básicas dos simuladores para ensino e treinamento e sua utilização para o treinamento de operadores. Adicionalmente são definidas as terminologias e os requisitos necessários aos simuladores da dinâmica de SEE.

No capítulo 3 é apresentada a formulação matemática do problema da simulação da dinâmica de SEE, sendo apresentados os esquemas básicos de solução deste problema.

No capítulo 4 apresenta-se resumidamente uma revisão bibliográfica da modelagem utilizada para representar os equipamentos do sistema.

No capítulo 5 são descritos os conceitos gerais da Programação Orientada a Objetos, sendo posteriormente proposta a modelagem orientada a objetos para os elementos do SEE.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos. Especial ênfase é dada à análise do

desempenho computacional da programação orientada a objetos para simuladores de SEE.

No capítulo 7 são apresentadas conclusões e sugestões para futuros trabalho nesta área.

O apêndice A apresenta em detalhes a modelagem utilizada para representar os equipamentos do SEE.

O apêndice B apresenta a aplicação da regra trapezoidal implícita ao conjunto de equações diferenciais da máquina síncrona.

No apêndice C é apresentada a aplicação da regra trapezoidal implícita a um conjunto de blocos padrão, utilizados na modelagem da maioria dos controladores e equipamentos do SEE.

Um glossário de símbolos é apresentado no final deste trabalho

CAPÍTULO 2

SIMULADORES PARA SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Ao longo dos últimos anos os Sistemas de Energia Elétrica tiveram um notável crescimento, tanto em magnitude quanto em complexidade da operação. Não é mais possível, em vista desta enorme complexidade, operar um SEE baseado apenas em regras de conduta estabelecidas para situações emergenciais. Mesmo operadores com grande experiência tem dificuldades em prever o comportamento do sistema frente a um distúrbio. Sobretudo quando este distúrbio possui elevado grau de severidade, como curtos-circuitos, abertura de linhas de transmissão importantes, perda de grandes unidades geradoras ou blocos de carga. Por esta razão, programas para simular o comportamento dinâmico de SEE frente a determinados eventos tornaram-se de vital importância para auxiliar os operadores no gerenciamento dos SEE. Assim, simuladores computacionais tem, cada vez mais, sido utilizados pelas empresas para o treinamento e qualificação de seus operadores.

Neste capítulo inicialmente descrevem-se as características básicas dos modernos centros de supervisão e controle, dando um especial enfoque na utilização dos simuladores de SEE como ferramenta de auxílio, bem como para o treinamento dos operadores. Na segunda parte é definida a terminologia básica utilizada em simuladores de SEE bem como os requisitos de um simulador de SEE.

2.1. Gerenciamento de Sistemas de Energia Elétrica

O enorme crescimento dos centros de carga aliado a necessidade de redução nos custos de operação dos SEE levaram a instalação das novas unidade de geração em locais com maior disponibilidade de recursos energéticos, na maioria das vezes longe dos centros consumidores. Isto fez com que grandes blocos de potência fossem transmitidos das unidades geradoras aos centros de carga através de longas linhas de transmissão.

Paralelamente a isso, as empresas de energia elétrica passaram a interconectar seus sistemas através de grandes redes de transmissão, o que permitiu que a energia excedente de uma determinada empresa pudesse ser enviada para outra, geralmente com poucos recursos de geração. Assim contratos de intercâmbio entre empresas foram definidos, aumentando a confiabilidade dos SEE e permitindo a sua operação com menor capacidade de geração instalada.

Como consequência das razões acima, o tamanho e principalmente a complexidade dos SEE aumentaram consideravelmente, gerando a necessidade da implementação de centros unificados (Centro de Operação do Sistema - COS) para a monitoração e controle do estado de operação global dos SEEs interligados. Os centros de controle possuem então como principal tarefa a manutenção do SEE operando na forma mais econômica e segura possível, preferencialmente mantendo a boa qualidade e continuidade da energia elétrica [1].

A estrutura organizacional de um grande SEE interligado define vários níveis hierárquicos de centros de supervisão e controle, conforme é ilustrado resumidamente pela figura 2.1.

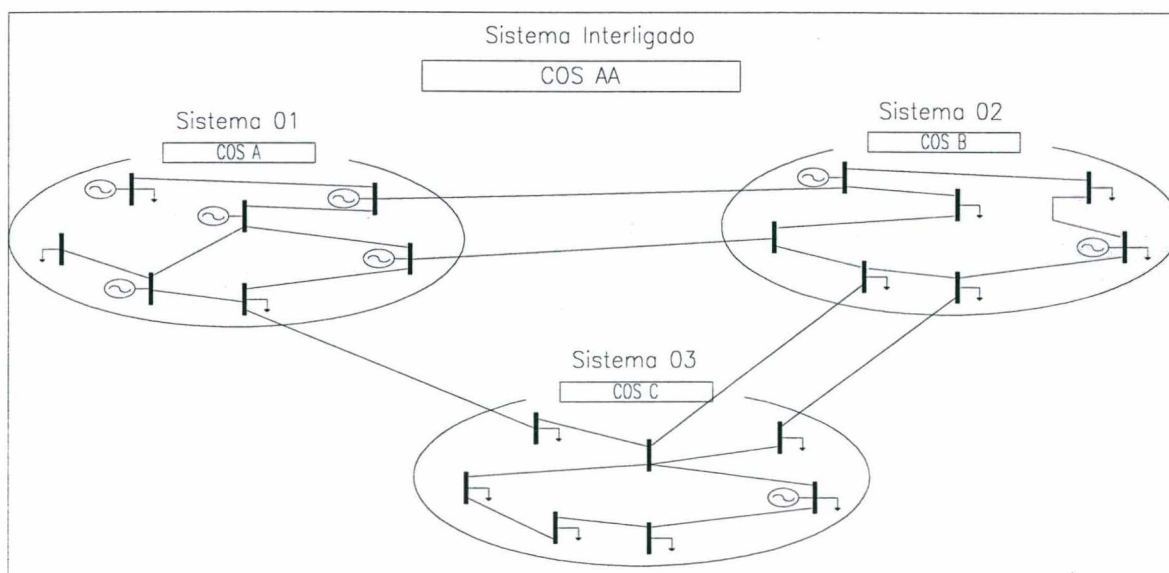


Figura 2.1 - Configuração dos COSs em um SEE interligado

Um grande sistema interligado possui então um centro de supervisão e controle central (COS AA), geralmente responsável pela manutenção global da segurança dos sistemas, e, subordinado a ele, vários centros de controle regionais ou locais (COSs A, B e C). Estes são responsáveis pela qualidade no fornecimento de energia elétrica a própria área de controle e pela manutenção dos níveis de intercâmbio programado. Os sistemas que constituem um SEE interligado (Sistemas 1, 2 e 3) podem ainda possuir outros níveis hierárquicos de centros de controle, geralmente associados a uma subárea específica que necessita de supervisão ou ao controle de equipamentos individuais.

As longas distâncias existentes entre os centros de controle e determinados pontos do SEE, onde localizam-se variáveis que necessitam ser monitoradas, impõem a adoção de um sistema próprio para a aquisição e envio de informações aos centros de controle. Unidades remotas de controle e medição são então instaladas em vários pontos do SEE. Sua finalidade é transmitir aos centros de controle informações de uma ou mais variáveis que necessitam ser monitoradas. As unidades remotas podem também receber dos centros de controle comandos para atuação de funções específicas de algum equipamento, permitindo assim que algumas ações de controle sobre o SEE sejam efetuadas. A comunicação entre as unidades remotas e os centros de controle é geralmente feita por rede telefônica [1].

2.1.1. Centros de Supervisão e Controle

O centro de supervisão e controle é o local onde é realizada a monitoração e o controle do estado de operação de um SEE. Todas as informações que descrevem o estado atual do SEE, provenientes do sistema de aquisição de dados, são enviadas aos centros de controle onde são processadas via computador e apresentadas ao operador por meio de dispositivos de interação homem-máquina [24]. O operador baseado nestas informações pode tomar medidas corretivas atuando diretamente sobre os dispositivos monitorados, se estes possuírem telecomando, ou através de solicitação aos operadores responsáveis pelo controle dos mesmos.

As funções de um centro de supervisão e controle são divididas em três grupos [24,25] :

- **Controle da Geração** : o controle da geração envolve as funções do controle automático de geração e do despacho econômico. O controle automático da geração (CAG) é responsável pela manutenção da frequência do SEE a níveis aceitáveis, bem como pela manutenção dos intercâmbios programados entre áreas. A atuação do CAG é efetuada através do ajuste na gera-

ção de um determinado grupo de unidades geradoras. O despacho econômico, por sua vez, é a ferramenta que fornece estes ajustes para o CAG, levando em conta a minimização dos custos de operação e a confiabilidade da geração;

- **Sistema Supervisor** : o sistema de aquisição de dados (“*Supervisory Control and Data Acquisition*” - SCADA) realiza a monitoração do estado atual do SEE. Informações relativas ao comportamento de variáveis do SEE e do estado operativo de diversos equipamentos são coletadas pelas unidades remotas e enviadas ao centro de supervisão e controle. Estas informações são então processadas e apresentadas ao console do operador;

- **Operação em Tempo Real** : a operação em tempo real é uma extensão do SCADA e constitui-se de uma série de ferramentas computacionais que podem ser solicitadas pelo operador em tempo real. As principais funções disponíveis são : a estimação de estado, a análise de contingências e monitoração da segurança, a previsão da carga, o fluxo de carga e o fluxo de carga ótimo. Todas estas ferramentas atuam no sentido de auxiliar o operador na tomada de decisões durante situações normais ou de emergência.

Em um centro de supervisão e controle, muitas vezes, o operador tem a necessidade de simular uma ação de controle antes de efetuar-la no sistema elétrico real, afim de avaliar se o estado do sistema após esta determinada ação de controle não estará violando certos limites de operação. Este tipo de estudo pela sua própria natureza não é realizado em tempo real, sendo realizado em um ambiente denominado *Ambiente de Estudos* [1]. No ambiente de estudos não há o comprometimento com o tempo real. Por esta razão, ferramentas mais elaboradas podem ser utilizadas para simular precisamente o comportamento do sistema. Entre elas destacam-se as de simulação da dinâmica dos SEE (simulações transitórias e simulações de longo prazo). A atual tendência de operação dos SEE próximo aos seus limites operativos, devido principalmente a falta de investimento na expansão do SEE, fez com que as ferramentas de simulação da dinâmica ganhassem especial importância nos centros de supervisão e controle, uma vez que um SEE operando próximo aos seus limites pode não alcançar um novo estado de equilíbrio após uma perturbação ou mesmo uma ação de controle.

Um moderno centro de controle, como foi exposto anteriormente, possui uma grande diversidade de funções e peculiaridades que tornam o gerenciamento de grandes SEE interligados uma tarefa bastante complexa, principalmente durante situações emergenciais onde os operadores devem rapidamente identificar o problema, a partir das informações apresentadas pelo SCADA, e tomar as medidas corretivas adequadas para evitar que o SEE entre em colapso. Esta

realidade exige que as empresas invistam no treinamento e qualificação dos seus operadores, tornando-os aptos para o gerenciamento dos grandes sistemas interligados.

Dentre as ferramentas mais utilizadas no treinamento dos operadores destacam-se os Simuladores para Ensino e Treinamento. Estas ferramentas simulam em um computador digital todos os eventos que podem ocorrer em um centro de controle real, submetendo o profissional à várias situações de operação. O componente básico deste tipo de ferramenta é geralmente um programa para simulação da dinâmica de SEE.

2.1.2. Simuladores para Ensino e Treinamento

Um simulador para ensino e treinamento é um ambiente onde é possível simular todos os eventos e situações que o operador pode vivenciar na operação de um SEE real. Os simuladores expõem os operadores a situações emergenciais que não ocorrem freqüentemente em um centro de supervisão e controle. Desta forma, eventos como curtos-circuitos severos, colapsos de tensão, operação isolada de parte do SEE devido à ilhamentos, perda de grandes unidades de geração ou blocos de carga podem ser simulados e as respectivas ações de controle tomadas sem qualquer risco para o SEE real [1,7,8,9,10,11,17,26].

Um simulador para ensino e treinamento pode ser dividido em quatro módulos básicos [1]:

- **Módulo de simulação da carga** : a evolução temporal da carga nas barras de um SEE é de difícil modelagem matematicamente. Por esta razão é necessário um módulo que reproduza seu comportamento, normalmente na forma de curvas discretizadas ao longo do tempo de simulação. Com o objetivo de obter maior realismo na simulação pode-se ainda simular um comportamento aleatório para a carga, dentro de uma faixa delimitada e em torno da curva estabelecida. Em algumas configurações de simuladores o estado inicial do SEE é suprido pelo próprio SCADA, deslocando assim o estado atual do SEE para o ambiente de simulação;

- **Módulo de simulação do SEE** : o módulo de simulação pode ser considerado o módulo mais importante para um simulador de ensino e treinamento. Este módulo é o responsável pela determinação em tempo real do comportamento do SEE frente aos cenários definidos para o treinamento do operador. O módulo de simulação deve então reproduzir exatamente o comportamento do SEE em todas as situações de operação simuladas, respondendo inclusive às ações de controle tomadas pelo operador durante o treinamento. Este módulo é o objeto princi-

pal deste trabalho e será tratado com maiores detalhes posteriormente;

- ***Módulo de funções disponíveis no centro de controle*** : a fim de representar exatamente as condições de um centro de controle, o simulador para ensino e treinamento deve ter disponível para o operador todas as funções da operação em tempo real. Assim, a estimação de estado, a análise de contingências, o fluxo de carga ótimo bem como todas as outras ferramentas devem estar disponíveis para auxiliar a tomada de decisões do operador em treinamento;

- ***Módulo de interface homem-máquina (operador - instrutor)*** : o módulo de interface com o operador constitui-se de uma réplica do console de operação do centro de controle. O operador deve então possuir acesso a todas as informações, funções de operação em tempo real e controles que estiverem disponíveis no centro de controle real. Ao console do instrutor deve-se permitir que este possa definir e modificar cenários para a simulação, alterar a topologia do SEE, introduzir novos eventos bem como avaliar o desempenho geral dos operadores sob treinamento.

Em um centro de controle real as informações provenientes do SCADA são atualizadas e apresentadas ao console do operador a intervalos regulares de tempo, tipicamente 5 segundos. Para operar em tempo real o simulador deve então determinar o comportamento do SEE e apresentar os resultados ao console do operador no mesmo intervalo de tempo que o SCADA real executa sua função. Sendo assim, o simulador deve ser capaz de simular neste intervalo de tempo o comportamento temporal da carga, realizar a configuração da rede elétrica, resolver as equações que descrevem o comportamento do SEE, atualizar a interface gráfica visual do console do operador e ainda possuir a capacidade de, se requisitado pelo operador, executar todas as funções da operação em tempo real. Mesmo com toda a evolução tecnológica dos computadores atuais é praticamente impossível, para SEEs de médio e grande porte, que uma única máquina execute todas estas tarefas em tempo real. Isto limita então a utilização dos simuladores à SEEs de pequeno porte, normalmente equivalentes dos SEEs reais. O recente desenvolvimento de técnicas de processamento paralelo e processamento distribuído tem surgido como uma alternativa viável para o desenvolvimento de um ambiente completo de simulação para sistemas de médio porte [16,18,19,20,27,28] , onde então a execução das diversas tarefas citadas acima podem ser realizadas por várias máquinas diferentes operando conjuntamente.

2.1.2.1. Módulo de Simulação do SEE

O módulo de simulação, responsável pela determinação do comportamento do SEE, é

sem dúvida o mais importante de um Simulador para Ensino e Treinamento, uma vez que irá representar o comportamento do SEE real no ambiente de simulação. Diferentes técnicas de simulação podem ser utilizadas para a implementação deste módulo, definindo assim dois tipos básicos de simuladores :

- ***Simuladores com módulo de simulação estático*** : esta classe de simuladores utiliza uma modelagem matemática estática (invariante no tempo) para representar os elementos do SEE. Na abordagem estática utiliza-se geralmente o fluxo de potência para resolver as equações que determinam o estado de operação do SEE. Os simuladores estáticos possuem a vantagem de serem extremamente rápidos, entretanto determinados eventos não podem ser precisamente simulados em virtude das limitações impostas pelos modelos [6,7,8];

- ***Simuladores com módulo de simulação dinâmico*** : esta classe de simuladores utiliza a modelagem completa para representar os elementos do SEE. Equações diferenciais são utilizadas para representar detalhadamente o comportamento dos elementos dinâmicos. Nesta abordagem o módulo de simulação constitui-se de um programa para a Simulação da Dinâmica de SEE, permitindo que todo e qualquer tipo de evento possa ser precisamente simulado [9,10,11, 20,28]. Em virtude da modelagem utilizada e conseqüentemente do grande esforço computacional envolvido, os simuladores dinâmicos estão limitados a simulações de SEE de pequeno porte. Esta classe de simuladores é o objeto de estudo deste trabalho.

A seguir são descritas as características básicas do problema da simulação da dinâmica de SEE e a terminologia comumente empregada. Apresentam-se também os requisitos necessários a um programa de simulação para simuladores de treinamento. É interessante salientar que um módulo de simulação bem elaborado pode ser utilizado como ferramenta de estudo do comportamento dinâmico dos SEE sem que necessariamente esteja inserido em um ambiente completo de simulação para ensino e treinamento [10,20,28]. De fato, vários simuladores para ensino e treinamento atualmente em uso utilizaram programas de simulação da dinâmica já existentes para implementar o seu módulo de simulação.

2.2. Simulação da Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica

Os estudos convencionais de Simulação da Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica geralmente consistem na determinação da resposta do SEE após um determinado distúrbio. O

processo utilizado para determinar a resposta do SEE é a solução passo a passo das equações diferenciais e algébricas que descrevem o comportamento dinâmico dos elementos do SEE [29,30]. Com base no resultado da simulação pode-se determinar, para o intervalo de tempo simulado, se o SEE alcançará um novo ponto estável de operação ou será conduzido ao colapso após o distúrbio.

Os estudos da dinâmica de SEE são classificados, atualmente, em duas categorias.

- ***Simulação da Dinâmica de Curto Prazo*** : Neste categoria são incluídos os estudos de até, no máximo, 8 segundos após a ocorrência de grandes perturbações [29]. Esta simulação é caracterizada pelos curtos períodos de tempo simulados e pela representação somente de elementos do sistema que possuem comportamento dinâmico bastante rápido. Os elementos com comportamento dinâmico lento geralmente são desconsiderados, uma vez que sua representação é praticamente irrelevante neste intervalo de tempo;

- ***Simulação da Dinâmica de Longo Prazo*** : toda simulação em que o intervalo de tempo excede o limite de 8 segundos pode ser considerada de longo prazo. As simulações de longo prazo caracterizam-se pelos longos períodos de tempo simulado e pela representação de elementos que não são usualmente representados em estudos de estabilidade transitória. Desta forma, elementos de comportamento bastante lento necessitam ser representados, uma vez que, em vista dos longos intervalos de simulação, são relevantes para a análise do comportamento dinâmico do sistema.

A escolha de quais elementos devem ser representados em um ou outro tipo de estudo varia de acordo com o nível de detalhamento que se deseja do SEE. Entretanto, é consenso que os estudos de estabilidade transitória devem representar pelo menos o efeito transitório das máquinas síncronas e do seu sistema de excitação, ao passo que os estudos de estabilidade de longo prazo devem incluir ainda, pelo menos, o sistema de regulação de velocidade das máquinas síncronas. A figura 2.2 [40] ilustra a faixa de valores típicos das constantes de tempo de alguns dos principais elementos do SEE. Esta ilustração mostra aproximadamente o tempo que cada elemento leva para alterar as variáveis que descrevem o seu estado de operação e pode ser tomada como base para determinar os elementos que devem ser incluídos na simulação a partir do horizonte de tempo do estudo.

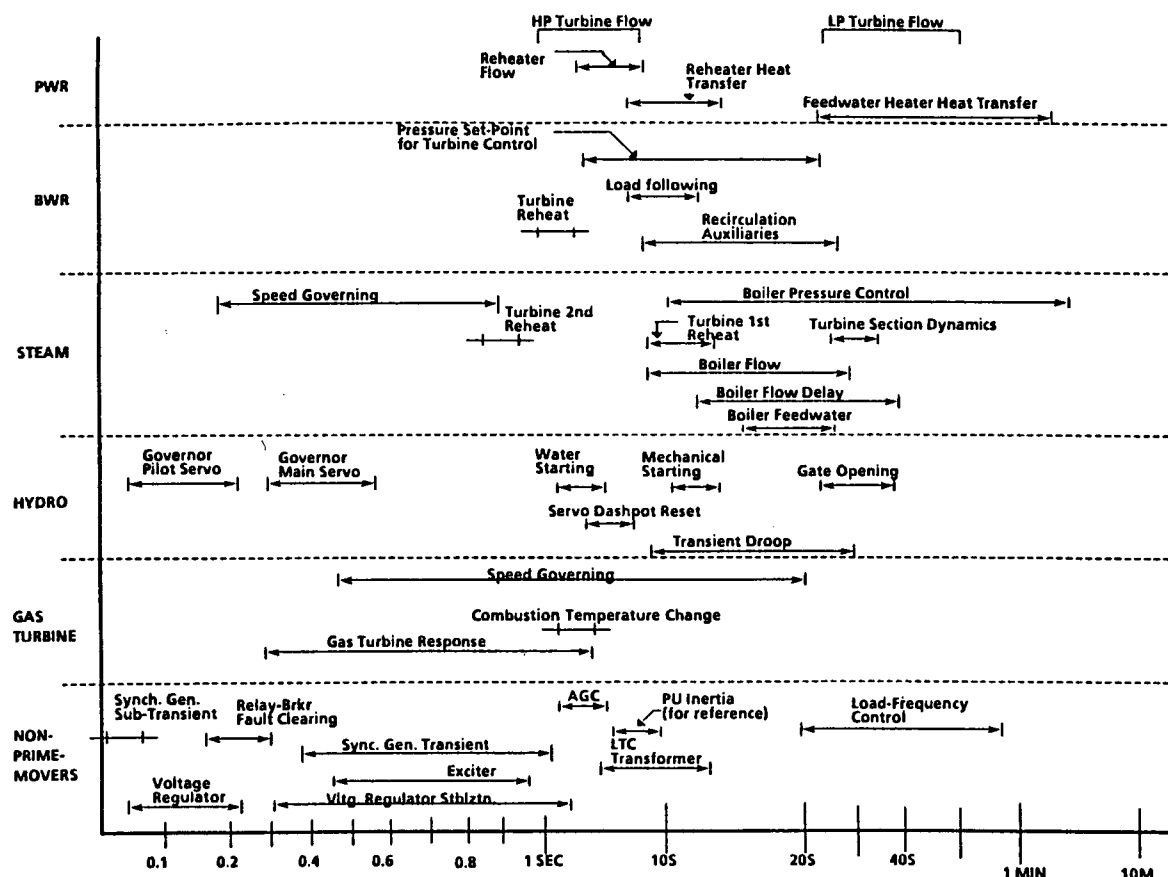


Figura 2.2 - Representação das constantes de tempo dos elementos de um SEE [40]

Em virtude da necessidade de simulação de longos períodos de tempo os simuladores de longo prazo são os mais adequados para compor o módulo dinâmico dos simuladores para ensino e treinamento. Além disso, esta classe de simuladores pode também representar detalhadamente os elementos que tradicionalmente são considerados nos estudos de estabilidade transitória. A seguir são brevemente descritas as características básicas dos simuladores para estabilidade transitória e, com maior detalhamento, as características necessárias aos simuladores de longo prazo.

2.2.1. Simuladores da Dinâmica de Curto Prazo

Os simuladores utilizados para estudos de estabilidade transitória já estão bem estabelecidos [29,30,31,32,35,36,37,38]. Anos de intensa utilização qualificaram um conjunto de técnicas e modelos que são plenamente aceitos para este tipo de simulação. Nos estudos de estabilidade transitória o principal interesse é a permanência, ou não, em sincronismo das máquinas síncronas, sendo a determinação da estabilidade do SEE estabelecida a partir da oscilação dos

ângulos de tais máquinas síncronas. A modelagem utilizada geralmente limita-se a representação das máquinas síncronas, seu sistema de excitação e sinais estabilizadores. Mais recentemente foram incluídos nestes estudos modelos para os dispositivos FACTS.

A evolução da tecnologia dos computadores, principalmente na área de processamento paralelo, fez com que recentemente a simulação da estabilidade transitória ganhasse um novo impulso, através da adoção de técnicas que permitiram reduzir o tempo computacional deste tipo de estudo [19,20,27].

2.2.2. Simuladores da Dinâmica de Longo Prazo

Os simuladores para estudos de longo prazo são objeto de estudo recente. Por este motivo as técnicas e modelos utilizados ainda não estão perfeitamente definidas, estando ainda em fase de proposições e definições. Ao contrário da estabilidade transitória, o principal interesse em estudos de longa duração são os eventos que se seguem por um longo período de tempo após um grande distúrbio no SEE. Geralmente analisam-se os efeitos das excursões da tensão e da frequência no SEE [3,12,13,15,39,41]. Entretanto simulações de longo prazo também despertam interesse para [3,4] :

- ajustar esquemas de alívio de carga;
- determinar alternativas de controle para caldeiras;
- ajuste das reservas de potência reativa;
- analisar o efeito de cortes manuais de carga em situações de emergência;
- determinar procedimentos de emergência para os operadores;
- definir estratégias para o Controle Automático de Geração.

Recentes estudos de Estabilidade de Tensão também começaram a utilizar as simulações de longo prazo como ferramenta para a análise da dinâmica destes fenômenos [42].

Em virtude deste tipo de estudo estender-se por longos períodos de simulação, geralmente minutos ou horas, vários aspectos relativos a modelagem utilizada e ao tempo computacional envolvido devem ser avaliados. Quanto a modelagem utilizada, o “*Electric Power Research Institute - EPRI*” organizou um relatório há alguns anos atrás [3] que procurava estabelecer critérios para a implementação de um programa para simulação de longo prazo. Este relatório sugere que em simulações de longa duração sejam representadas as seguintes classes de ele-

mentos:

- sistema de regulação da velocidade das máquinas síncronas, definido pela inclusão de modelos para turbinas (térmicas, hidráulicas e a gás) e respectivos reguladores de velocidade;
- sistema de geração de vapor para as unidades com geração termelétrica. O sistema de geração de vapor é constituído pelas caldeiras e respectivos controles para as unidades essencialmente térmicas e pelos reatores nucleares para as unidade com geração termonuclear;
- cargas variantes no tempo e cargas dinâmicas como motores de indução;
- sistema de regulação da frequência do SEE e controle dos intercâmbios programados, representado pelo Controle Automático de Geração (CAG);
- alívio de carga pelos esquemas automáticos;
- sistema de proteção, através da inclusão dos relés de subfrequência, relés de subtensão, relés de perda da excitação nas máquinas síncronas, relés de distância além dos relés de propósito geral como os de sobrecorrente temporizados e de religamento automático.

A modelagem recomendada pelo EPRI define um quadro bastante abrangente de fenômenos para serem representados no SEE.

Com relação ao tempo computacional envolvido nas simulações, embora ainda não existam estratégias definitivamente aceitas, alguns esquemas vem sendo utilizados para tentar reduzi-lo [5,12,13,15]. Entre estes esquemas destaca-se a utilização de modelos simplificados para os elementos que possuem comportamento dinâmico muito rápido, o que permite a utilização de passos de integração para as equações diferenciais muito maiores que os utilizados em simulações de estabilidade transitória [5,12]. Estas técnicas procuram evidenciar os fenômenos mais lentos do SEE desconsiderando ou simplificando os fenômenos rápidos. A adoção de tais técnicas diminui o tempo total do processo de simulação consideravelmente, entretanto os fenômenos transitórios rápidos do SEE não podem ser visualizados. Esta técnica, no entanto, não é recomendada pela referência [4].

A implementação de um programa de simulação de longo prazo, que será utilizado para compor um módulo de simulação para Simuladores de Ensino e Treinamento, é o objetivo básico deste trabalho. Assim alguns critérios e requisitos devem ser impostos ao módulo de simulação :

- O programa desenvolvido deve ser de propósito geral, permitindo assim que tanto estudos de estabilidade transitória como estudos de estabilidade de longo prazo sejam realizados

sem qualquer alteração no código do programa. Isto implica que o programa deve possuir, disponível para uso, tanto os modelos usuais, para simulações de estabilidade transitória, quanto os modelos necessários à simulação de longo prazo;

- Técnicas de aceleração do processo de simulação devem ser implementadas sem que seja necessário simplificar os modelos utilizados;
- Todos os eventos mais comuns que ocorrem em um SEE real devem estar disponíveis para serem simulados, bem como as ações de controle usualmente disponíveis em qualquer nível dos centros de controle;
- O programa deve permitir que qualquer variável do SEE, relevante ou não para a simulação, seja monitorada e armazenada para análise posterior;
- Técnicas modernas de programação computacional devem ser incluídas a fim de permitir que o programa possua elevada portabilidade e facilidade de manutenção e atualização.

Dentre os requisitos impostos ao módulo de simulação, a utilização de técnicas modernas de programação merece especial atenção. Para programas de simulação da dinâmica de SEE esta característica é fundamental, sobretudo devido às constantes inclusões de novos equipamentos no SEE e aprimoramento das técnicas e estratégias de controle. Quanto a Simuladores para Ensino e Treinamento, é indispensável que o módulo computacional desenvolvido seja altamente modular, permitindo a sua fácil inclusão no ambiente de simulação sem que sejam necessárias alterações excessivas no código. Além disto, o desenvolvimento de programas computacionais de médio e grande porte é freqüentemente realizado por equipes compostas por vários programadores, introduzindo dificuldades no gerenciamento e homogeneidade do programa desenvolvido. Isto é particularmente evidenciado em ambiente acadêmico, onde a alta rotatividade de recursos humanos impede a formação de uma equipe única durante todas as fases do desenvolvimento do programa. Nos últimos anos desenvolveram-se técnicas e linguagens de programação que aumentam bastante as características de modularidade, portabilidade, facilidade de manutenção e atualização dos programas, tendo estas técnicas recebido enorme aceitação no desenvolvimento de projetos de médio e principalmente de grande porte. Dentre estas técnicas e linguagens figuram a Programação Orientada à Objetos e o C++, respectivamente, que serão utilizados neste trabalho para implementar o módulo dinâmico de simulação.

2.3. Conclusões

Este capítulo foi dividido em duas partes principais. Na primeira, foram descritas as características básicas dos centros de supervisão e controle e a utilização dos simuladores da dinâmica de SEE como ferramenta de auxílio na previsão do comportamento do SEE após a definição de alguma estratégia de operação ou controle. O conceito de Simulador para Ensino e Treinamento foi estabelecido e seus módulos básicos apresentados, dando especial ênfase ao módulo de simulação por ser o enfoque principal deste trabalho.

Na segunda parte foram apresentados os conceitos gerais e a terminologia básica utilizada em simuladores da dinâmica de SEE sendo definidos os conceitos de simuladores para a dinâmica de curto e de longo prazo. Finalmente, os requisitos e critérios necessários à implementação de um módulo para a simulação da dinâmica de longo prazo foram definidos.

Nos capítulos seguintes serão apresentadas as técnicas e modelos utilizados na implementação do módulo computacional proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 3

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PARA A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

A enorme variedade de modelos não-lineares utilizados para representar os elementos de um SEE associada aos requisitos de precisão e estabilidade numérica, necessários a um programa de simulação, exigem um cuidadoso tratamento matemático na resolução do conjunto de equações que descrevem a dinâmica dos SEE. A técnica geralmente utilizada é a resolução numérica passo a passo do conjunto de equações diferenciais e algébricas que descrevem o comportamento do SEE. A dimensão e a própria natureza deste problema fazem com que a simulação da dinâmica de SEE figure entre os problemas de grande porte da área de SEE.

Neste capítulo é apresentada a formalização matemática do problema da simulação dinâmica de SEE, sendo introduzidos e discutidos os dois esquemas básicos utilizados na solução do conjunto de equações que descrevem a dinâmica do SEE. Especial enfoque é dado ao Esquema Alternado de solução, uma vez que o mesmo é empregado neste trabalho. O método utilizado para a solução numérica das equações diferenciais será também apresentado e suas características quanto a precisão, desempenho computacional e estabilidade numérica discutidas. Estas características são relevantes durante simulações de longa duração, onde problemas relativos principalmente a propagação de erros são evidenciados.

3.1. A Simulação de Sistemas de Energia Elétrica

O problema da simulação da dinâmica de sistemas de energia elétrica resume-se basicamente na solução de um conjunto de equações diferenciais e algébricas que descreve a trajetória ao longo do tempo das variáveis determinantes do estado do SEE. Tradicionalmente utiliza-se a simulação passo a passo para resolver este problema. A técnica utilizada consiste em transformar o conjunto de equações diferenciais em um conjunto de equações algébricas a diferenças, através de algum método de integração numérica, e então resolvê-las juntamente com o conjunto de equações originalmente algébricas, passo a passo, ao longo do intervalo de tempo desejado [29,31,35,36,37,38]. Os requisitos necessários à solução numérica do sistema de equações algébrico-diferencial podem ser salientadas :

- **Exatidão da solução** : o esquema adotado para solucionar o conjunto de equações deve fornecer resultados suficientemente exatos, de maneira que a resposta fornecida pela simulação seja a mais próxima possível do comportamento real do SEE. Em estudos de estabilidade transitória é comum medir o erro da simulação computacional através do máximo erro nos ângulos das máquinas síncronas [29]. Em simulações de longo prazo, entretanto, não existe uma grandeza plenamente aceita para a medida do erro da simulação;
- **Robustez do método** : o método utilizado para solucionar o conjunto de equações deve ser robusto, permitindo que qualquer distúrbio ou fenômeno real do SEE possa ser reproduzido na simulação sem que isto acarrete problemas de estabilidade numérica ou exatidão dos resultados fornecidos pelo simulador;
- **Flexibilidade** : esta característica refere-se a possibilidade da inclusão de novos modelos ou sofisticação dos antigos sem que excessivos esforços sejam necessários;
- **Eficiência computacional** : o método adotado deve ser computacionalmente eficiente. Este requisito é fundamental para os simuladores de ensino e treinamento, onde a simulação em tempo real deve ser possível pelo menos para sistemas de pequeno porte.

A escolha do método que será utilizado para solucionar o conjunto de equações algébrico-diferenciais que representa o SEE deve levar em consideração os requisitos expostos acima. A seguir é definida a formulação matemática geral do problema da simulação da dinâmica de SEE.

3.1.1. Formulação geral do problema

Genericamente o comportamento dinâmico do SEE pode ser descrito por um conjunto de Equações Diferenciais Ordinárias não-lineares (EDOs) e por um conjunto de Equações Algébricas não-lineares (EAs). Este conjunto de equações pode ser escrito na seguinte forma [27,29,31,39] :

$$\dot{x} = f(x,z) \quad (3.1)$$

$$0 = g(x,z) \quad (3.2)$$

onde :

f - função não-linear que define as equações diferenciais ordinárias;

g - função não-linear que define as equações algébricas;

x - vetor das variáveis de estado;

z - vetor das variáveis algébricas.

O conjunto de equações 3.1 é constituído pelas equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico dos elementos do SEE, tais como máquinas síncronas, reguladores de tensão e velocidade, turbinas, caldeiras, dispositivos FACTS, etc. O conjunto de equações algébricas 3.2 representa as equações que definem o comportamento da rede elétrica e parcelas dos elementos dinâmicos que podem ser formuladas algebricamente.

Para a resolução do conjunto de equações diferenciais apresentado acima, usualmente, transforma-se as equações diferenciais em equações algébricas a diferenças, através da aplicação de algum método de integração numérica, e então resolve-se o conjunto de equações 3.1 passo a passo ao longo do tempo.

3.1.2. Método de Solução Numérica para as EDOs

Os métodos para solução numérica de EDOs são classificados em explícitos e implícitos. Os métodos explícitos foram durante muito tempo bastante utilizados em programas de simulação da dinâmica de SEE devido principalmente às suas características quanto a facilidade de implementação e desempenho computacional. De fato, atualmente muitos programas comerciais ainda utilizam esta categoria de métodos de integração. Entretanto, a baixa estabilidade numérica apresentada pelos métodos explícitos, sobretudo quando passos de integração relativamente

elevados são utilizados, contribuiu para que esta classe de métodos fosse lentamente abandonada nos estudos de simulação de SEE. Entre os métodos explícitos mais conhecidos estão o método de Euler e os métodos de Runge-Kutta [29,38,43].

Os métodos implícitos de integração numérica apresentam melhores características quanto a estabilidade numérica que os métodos explícitos, sem adicionar grande esforço computacional ao programa [29,38]. Esta classe de métodos tem se destacado nas aplicações de simulação de SEE, sendo hoje em dia amplamente utilizados tanto em programas comerciais quanto acadêmicos. Os métodos implícitos tendem a manter suas características de estabilidade numérica mesmo com passos de integração relativamente elevados. Esta característica é particularmente atrativa para simulações de longa duração, onde a elevação do passo de integração contribui para aumentar o desempenho computacional da simulação [15,30,38,44,45].

O Método Trapezoidal Implícito (ou Regra Trapezoidal Implícita) tem sido utilizado na maioria dos programas comerciais desenvolvidos recentemente.

3.1.2.1. Método Trapezoidal Implícito

As características de desempenho computacional, precisão e principalmente estabilidade numérica fizeram do método trapezoidal implícito um dos mais utilizados no desenvolvimento de programas para a simulação da dinâmica de SEE. O método trapezoidal apresenta a conveniente característica de ser simetricamente A-estável [38], ou seja, não apresenta problemas de instabilidade numérica [29,30,38,43]. Esta característica particular do método trapezoidal implícito é fundamental para a simulação do comportamento dinâmico de SEE.

A aplicação da regra trapezoidal implícita a uma equação diferencial de primeira ordem, equação 3.3, resulta na equação algébrica a diferenças apresentada em 3.4 [30,38,43].

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.3)$$

$$x_{(t_1)} - x_{(t_0)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[f(x_{(t_0)}) + f(x_{(t_1)}) \right] \quad (3.4)$$

onde t_0 representa um instante de tempo qualquer, t_1 representa o instante de tempo seguinte ($t_1 = t_0 + \Delta t$), Δt é o passo de integração e f a função que descreve o comportamento da variável x .

Para simulações de longo prazo a regra trapezoidal é atrativa no sentido de permitir passos de integração relativamente elevados, além de permitir também que o valor do passo de integração seja alterado durante a simulação, contribuindo assim para aumentar o desempenho

computacional do programa. Por outro lado, a utilização de métodos de ordem mais elevada para as simulações de longo prazo pode ser conveniente devido ao aumento da precisão do método numérico em consequência da diminuição do erro de truncamento do método. Este erro propaga-se durante a simulação e pode ser significativo quando o tempo de simulação for muito elevado. No entanto, os métodos implícitos de ordem elevada não apresentam a característica de serem simetricamente A-estáveis e não serão considerados neste trabalho. De fato, a regra trapezoidal é o método de mais alta ordem que apresenta esta característica [38].

3.1.3. Esquemas de solução para as equações do SEE

Os esquemas que tradicionalmente são utilizados para a resolução do sistema formado pelas equações 3.1 e 3.2 podem ser classificados de acordo com o método de solução numérica das equações diferenciais, e de acordo com a estratégia de solução dos dois conjuntos de equações. O método de integração define esquemas explícitos e esquemas implícitos, enquanto que a estratégia de solução do conjunto de equações define os esquemas básicos alternado e simultâneo [27,29]. Combinações dos esquemas de solução básicos com os métodos de integração utilizados definem quatro esquemas de solução possíveis : esquema alternado implícito e explícito, e esquema simultâneo implícito e explícito [27].

Atualmente é consenso a utilização dos métodos implícitos para a solução numérica das equações diferenciais do SEE. Entretanto a definição entre o esquema simultâneo ou o esquema alternado para programas de simulação de SEE depende dos requisitos impostos e de particularidades do simulador, não sendo ainda plenamente aceita a superioridade de um dos esquemas sobre o outro [29,37]. A seguir são apresentados os dois esquemas básicos de solução.

3.1.3.1. Esquema Alternado

O esquema alternado de solução consiste em resolver separadamente e alternadamente o conjunto de equações algébricas a diferenças e o conjunto de equações originalmente algébricas do SEE [27,29,30,31,36]. Para facilitar o entendimento deste esquema e suas variantes as equações 3.1 e 3.2 podem ser reescritas na seguinte forma :

$$\dot{x} = A \cdot x + B \cdot u \quad (3.5)$$

$$I(E,V) = Y \cdot V \quad (3.6)$$

$$u = h(E, V) \quad (3.7)$$

onde :

x - é o vetor das variáveis de estado do SEE associadas às equações diferenciais;

A - é uma matriz quadrada, esparsa e geralmente bloco diagonal;

B - é uma matriz retangular, esparsa e formada por blocos;

u - é um vetor de variáveis algébricas que aparecem nas equações diferenciais;

I - é o vetor das injeções de corrente nos nós do SEE;

Y - é a matriz de admitâncias nodais do SEE na forma complexa;

V - é o vetor das tensões nodais do SEE;

E - é um subvetor de x constituído das variáveis de estado necessárias ao cálculo das injeções de corrente I ;

h - é um vetor de funções não lineares que descrevem as variáveis u .

O esquema alternado consiste em transformar o conjunto de equações diferenciais (equação 3.5) em um conjunto de equações algébricas a diferenças e, então, resolvê-las alternadamente e iterativamente com as equações algébricas da rede elétrica (equação 3.6) até que algum critério de convergência seja satisfeito. Este processo se repete para cada instante de tempo simulado. As variáveis de interface u dependem do vetor de tensões V e de um subvetor E das variáveis de estado x . Por esta razão, devem ser atualizadas a cada iteração do processo evitando assim erros de interface [27,29,31]. O desempenho computacional do esquema alternado tende a ser superior ao do esquema simultâneo [37]. Este esquema será adotado neste trabalho e discutido com maiores detalhes posteriormente.

3.1.3.2. Esquema Simultâneo

No esquema simultâneo as equações diferenciais são transformadas em equações algébricas a diferenças e então resolvidas simultaneamente com as equações originalmente algébricas compondo um sistema único de equações. Geralmente utiliza-se o método de Newton-Raphson para solucionar este sistema de equações [1,27,29,35,37]. A transformação do conjunto de equações diferenciais em um conjunto de equações algébricas a diferenças, através de algum método de integração numérica, resulta no conjunto de equações algébricas não lineares abaixo :

$$F(x, V^e) = 0 \quad (3.8)$$

$$G(x, V^e) = 0 \quad (3.9)$$

onde :

F - é um vetor de funções algébricas a diferenças não-lineares, resultante da discretização das equações diferenciais por algum método de integração numérica;

x - é o vetor das variáveis de estado associadas às equações diferenciais;

V^e - é o vetor das tensões nodais da rede elétrica na forma expandida (não complexa);

G - é um vetor de funções algébricas não-lineares que representa as equações da rede elétrica e parcelas dos elementos dinâmicos que podem ser formuladas algebricamente.

As equações algébricas não-lineares 3.8 e 3.9 podem ser reescritas na seguinte forma compacta :

$$H(x, V^e) = 0 \quad (3.10)$$

onde $H = [F, G]^T$.

Este sistema de equações é comumente resolvido através da aplicação do método de Newton-Raphson. O esquema simultâneo possui uma formalização matemática mais rigorosa que o esquema alternado, motivo pelo qual recentemente vem sendo bastante utilizado em programas para simulação de SEE [39,45].

A estrutura altamente esparsa da matriz Jacobiana do sistema deve ser explorada para uma eficiente implementação computacional do esquema simultâneo. Entretanto, este esquema possui um desempenho computacional inferior em relação ao alternado [37]. Isto ocorre em função da dimensão do sistema de equações a resolver e da necessidade de atualização e fatoração da matriz Jacobiana em todas as iterações, o que não acontece com o método alternado. Afim de minimizar o esforço computacional na atualização e fatoração da matriz Jacobiana, alguns trabalhos [1,27,29,37] propõem a utilização da mesma matriz para várias iterações ou mesmo vários passos de integração dando origem aos chamados métodos de Newton desonesto.

3.2. Esquema Alternado Implícito

O esquema de solução alternado, utilizando a regra trapezoidal implícita para a solução do conjunto de equações diferenciais, apresenta características e peculiaridades que o tornam

mais adequado às proposições feitas anteriormente para o desenvolvimento do módulo de simulação dinâmica. As principais características que levaram à escolha do esquema alternado implícito para ser implementado neste trabalho foram :

- ***Desempenho computacional*** : o esquema alternado apresenta uma melhor eficiência que o esquema simultâneo no que se refere ao desempenho computacional [37]. Esta característica é de fundamental importância tanto para simuladores de longo prazo quanto para simuladores de ensino e treinamento;
- ***Facilidade na implementação de novos elementos*** : esta talvez seja a característica mais atrativa do esquema alternado implícito, ou seja, a facilidade com que novos modelos ou elementos são incorporados a simulação. A resolução das equações diferenciais e das equações algébricas da rede elétrica como dois conjuntos de equações, resolvidos separadamente, permite esta característica ao esquema alternado. Salienta-se que a estrutura da matriz Jacobiana no esquema simultâneo altera-se com a inclusão de novos modelos, dificultando este procedimento;
- ***Robustez na simulação*** : o método alternado mostra-se robusto o suficiente para simular qualquer tipo de distúrbio ou evento que venha a ocorrer no SEE, tanto em simulações de longo prazo quanto em simulações de curto prazo;
- ***Estabilidade numérica da solução*** : a utilização da regra trapezoidal implícita para a solução das equações diferenciais garante uma excelente característica quanto a estabilidade numérica da solução, sendo este o principal motivo da sua adoção neste trabalho. Além disto, a regra trapezoidal, por ser um método de passo único, oferece facilidades para a variação do passo de integração durante a simulação.

Um outro aspecto em favor do esquema alternado é a dificuldade do esquema simultâneo para tratar pequenas descontinuidades que ocorrem nas equações diferenciais em função dos limites dos equipamentos de controle automático [27].

A seguir segue-se uma descrição mais detalhada do algoritmo do esquema alternado implícito.

3.2.1. Esquema geral

O esquema geral do método alternado implícito pode ser resumido no algoritmo a seguir, onde t representa o passo atual da simulação, T é o número total de passos da simulação, k é o contador de iterações do processo de solução de um passo, l é o contador de iterações do proces-

so de solução das equações da rede elétrica, ε_0 é a tolerância para convergência do processo de solução de um passo e ε_1 é a tolerância para convergência do processo de solução das equações da rede elétrica.

Inicialização (Condições iniciais do Fluxo de Potência)

Para $t = 1, 2, \dots, T$

faça $k = 0$

Calcule $u_{(t)}^, x_{(t)}^*$ (por extrapolação)*

Calcule $x_{(t)}^0 = F[x_{(t)}^, u_{(t)}^*, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$*

Enquanto $\|\Delta x\|_2^2 > \varepsilon_0$, faça

faça $l = 0$

Enquanto $\|\Delta V\|_2^2 > \varepsilon_1$, faça

Calcule $V_{(t)}^{l+1} = [Y]^{-1} \cdot I(E_{(t)}, V_{(t)}^l)$ (calcule Y^{-1} por fatoração LU)

Calcule $\Delta V = V_{(t)}^{l+1} - V_{(t)}^l$

faça $l = l + 1$

Fim Enquanto

Calcule $u_{(t)}^k = h(E_{(t)}, V_{(t)})$

Calcule $x_{(t)}^{k+1} = F[x_{(t)}^k, u_{(t)}^k, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$

Calcule $\Delta x = x_{(t)}^{k+1} - x_{(t)}^k$

faça $k = k + 1$

Fim Enquanto

Fim Para

Algumas peculiaridades do esquema alternado implícito são apresentadas abaixo :

- A matriz admitância nodal (Y) somente é alterada por ocorrência de alterações na configuração da rede elétrica (chaveamento de linhas de transmissão, curtos-circuitos, etc). Assim, a matriz Y pode ser atualizada e refatorada apenas nestas ocasiões, permanecendo inalterada por todo o resto da simulação. Esta característica proporciona excelente desempenho computacional ao esquema alternado. Salienta-se que no esquema simultâneo a matriz Jacobiana deve ser atua-

lizada e refatorada para cada iteração do processo, acarretando elevado esforço computacional;

- A resolução do conjunto de equações diferenciais do SEE torna-se iterativa devido a utilização de um método de integração implícito (Trapezoidal Implícito). Entretanto manipulações algébricas nas equações a diferenças permitem que uma forma explícita seja encontrada, evitando o processo iterativo e aumentando o desempenho computacional do processo;
- Na primeira iteração do esquema alternado é comum calcular a estimativa inicial das variáveis de estado (x) utilizando valores extrapolados para as variáveis de interface (u). Em iterações subsequentes as variáveis de interface são devidamente calculadas pelas funções que as definem. Esta prática visa obter uma melhor estimativa inicial das variáveis de estado, diminuindo o número de iterações requeridas para a convergência e, conseqüentemente, aumentando o desempenho computacional do esquema;
- Vários critérios podem ser adotados para determinar a convergência do processo, sendo mais utilizados aqueles baseados na norma do vetor de erros das variáveis de estado (Δx) entre duas iterações consecutivas. Alternativamente utiliza-se o vetor de erros das tensões nas barras. No algoritmo apresentado é utilizada a norma 2 ao quadrado do vetor de erros das variáveis de estado.

3.2.2. O Esquema Alternado Entrelaçado Implícito

As equações que definem a rede elétrica são não-lineares e devem ser resolvidas iterativamente para cada iteração do esquema alternado implícito, como demonstra claramente o algoritmo apresentado anteriormente. Uma variação do esquema alternado implícito consiste na relaxação da convergência das equações da rede elétrica. Esta metodologia é chamada Esquema Alternado Entrelaçado Implícito e realiza apenas uma iteração nas equações da rede elétrica para cada iteração do esquema alternado. O teste de convergência é realizado nas variáveis de estado não comprometendo a precisão do resultado final [27].

Esta variação do esquema alternado tem apresentado desempenho computacional superior ao esquema básico [27], sendo por este motivo adotado neste trabalho. O algoritmo do esquema alternado entrelaçado implícito é descrito abaixo :

Inicialização (Condições iniciais do Fluxo de Potência)

Para $t = 1, 2, \dots, T$

faça $k = 0$

Calcule $u_{(t)}^*, x_{(t)}^*$ *(por extrapolação)*

Calcule $x_{(t)}^o = F[x_{(t)}^*, u_{(t)}^*, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$

Enquanto $\|\Delta x\|_2^2 > \varepsilon_o$, *faça*

Calcule $V_{(t)} = [Y]^{-1} \cdot I(E_{(t)}, V_{(t)})$ *(calcule* Y^{-1} *por fatoração LU)*

Calcule $u_{(t)}^k = h(E_{(t)}, V_{(t)})$

Calcule $x_{(t)}^{k+1} = F[x_{(t)}^k, u_{(t)}^k, x_{(t-\Delta t)}, u_{(t-\Delta t)}]$

Calcule $\Delta x = x_{(t)}^{k+1} - x_{(t)}^k$

faça $k = k + 1$

Fim Enquanto

Fim Para

3.3. Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a formalização matemática para o problema da simulação da dinâmica de SEE, onde foram discutidos alguns requisitos matemáticos necessários aos esquemas de solução utilizados para este problema. Os métodos de integração numérica para resolução das equações diferenciais foram discutidos, sendo selecionada a regra trapezoidal implícita para utilização neste trabalho em virtude de suas características de estabilidade numérica.

Os dois esquemas básicos de solução para o conjunto de equações do SEE foram apresentados e algumas de suas peculiaridades discutidas. O esquema alternado implícito foi selecionado para ser implementado neste trabalho em virtude de suas características de desempenho computacional e facilidade de inclusão de novos elementos e modelos. Por fim, algumas particularidades específicas do esquema alternado implícito foram abordadas e discutidas.

O próximo capítulo apresenta a modelagem matemática para representar os equipamentos e dispositivos do SEE. Serão abordadas e discutidas as características destes elementos relativas a sua representação em simulações de curto e longo prazo.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SEE PARA SIMULAÇÃO

Neste capítulo são descritos os modelos matemáticos utilizados para representar os elementos de um SEE. Os modelos utilizados devem ser cuidadosamente selecionados em função do tipo de fenômeno que se deseja estudar e dos critérios impostos ao simulador.

A modelagem atualmente utilizada em programas para estudos de estabilidade transitória de SEE é muito bem determinada [27,30,36,37,38]. Entretanto, para simuladores de longo prazo, onde o tempo de simulação abrange um horizonte de minutos ou horas, certas hipóteses assumidas para estudos de curto prazo (estabilidade transitória) não podem mais ser mantidas, exigindo a representação de elementos do SEE que não são usualmente representados nos simuladores de curto prazo. Além disso, nas simulações de longo prazo, os fenômenos de interesse, geralmente, são as excursões de tensão e frequência no SEE, determinando então que os modelos adotados devem considerar estes efeitos.

Neste capítulo propõe-se a modelagem para o simulador que unifique a simulação de curto e longo prazo, permitindo a observação de ambos os fenômenos. Os critérios impostos ao simulador levaram à seleção de um conjunto de modelos para representar os elementos que compõem o SEE. Estes modelos são apresentados resumidamente neste capítulo, sendo descritos em detalhes no apêndice A.

4.1. Unidades de Geração

Em SEE uma unidade de geração é basicamente constituída pela máquina síncrona, sistemas de controle, turbina e pelo sistema de geração de vapor quando a unidade for térmica. A figura 4.1 ilustra com maior nível de detalhes os elementos que compõem a unidade de geração, e a conexão desta à rede elétrica do SEE.

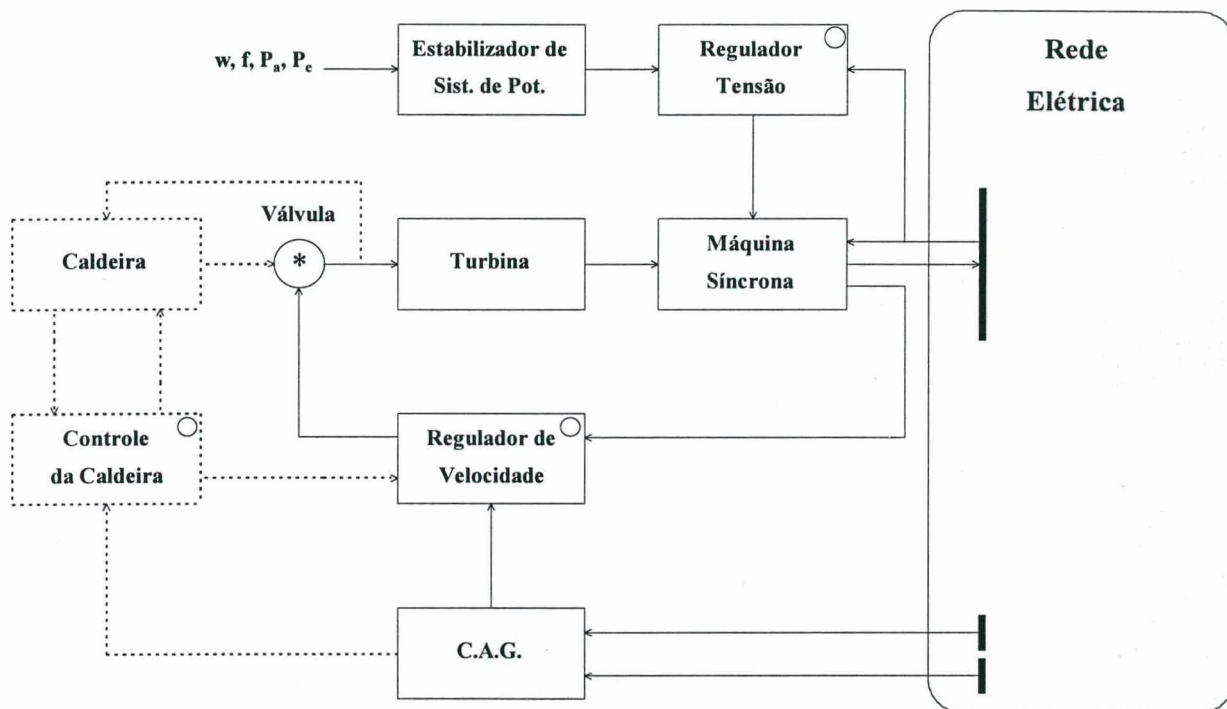


Figura 4.1 - Diagrama funcional de uma Unidade de Geração

Os elementos desenhados em linha tracejada representam o sistema de geração de vapor e somente existem para as unidades de geração termelétricas, sendo eliminados nas hidroelétricas.

O conjunto de controladores representados na unidade de geração são os principais responsáveis pela manutenção da operação do sistema dentro de parâmetros pré-estabelecidos para o SEE. Três malhas de controle básicas são definidas :

- Sistema de Controle da Excitação : constituído pelo Regulador de Tensão. Esta malha de controle atua na manutenção do nível da tensão terminal da máquina síncrona, controlando a tensão gerada no estator e consequentemente a potência elétrica da máquina síncrona. O Sistema de Controle da Excitação geralmente possui constantes de tempo baixas, sendo então bastante rápido em relação aos demais controladores da unidade de geração. O estabilizador de sistemas

de potência atua na máquina síncrona através do Sistema de Excitação, sendo responsável pelo amortecimento das oscilações eletromecânicas da máquina;

- Sistema Primário de Regulação de Velocidade : constituído pelo Regulador de Velocidade. Esta malha de controle atua na manutenção do balanço Carga-Geração de um SEE. O Regulador de Velocidade controla o fluxo de vapor ou água que entra na turbina, controlando assim a potência mecânica entregue a máquina síncrona;

- Sistema Secundário de Regulação de Velocidade : constituído pelo Controle Automático de Geração (CAG). É bem conhecido que o sistema primário de regulação de velocidade não elimina completamente o desvio de velocidade da máquina síncrona [46,47,48]. Necessita-se assim de um esquema suplementar para o controle de velocidade. Este sistema é denominado Sistema Secundário de Regulação de Velocidade. Esta malha de controle elimina completamente o desvio de velocidade da máquina síncrona em relação a velocidade nominal, podendo ser usado também para restaurar os níveis de intercâmbio programado entre áreas ou o despacho econômico entre as unidades de geração.

Em *simulações de curto prazo*, para estudos de estabilidade transitória, usualmente representam-se apenas a máquina síncrona e o sistema de controle da excitação nas unidades de geração. A potência mecânica entregue pela turbina à máquina síncrona é praticamente constante neste horizonte de tempo, tipicamente de 5 segundos. Isto permite desconsiderar a dinâmica da turbina-caldeira e do sistema de regulação de velocidade. Unidades de geração que possuem um sistema de regulação de velocidade relativamente rápido podem ter a turbina e o regulador de velocidade representados em estudos de estabilidade transitória, mas isto não é o convencional.

Em *simulações de longo prazo*, com tempos de simulação da ordem de minutos ou horas, não é mais possível manter a hipótese de que a potência mecânica permanece inalterada. Neste caso representa-se a unidade de geração com o sistema de regulação de velocidade completo. Outro aspecto que pode ser levantado, com relação à modelagem freqüentemente utilizada para simulações de longo prazo, é a utilização de modelos simplificados para os elementos que possuem constantes de tempo muito baixas. Estas simplificações baseiam-se no fato de que os fenômenos de interesse para os estudos de longo prazo são da ordem de minutos, conduzindo a utilização de passos de integração de até 1 segundo. Isto não permite a observação dos efeitos dos elementos que possuem constantes de tempo muito baixas, que podem então ter sua dinâmica desconsiderada [1,5]. Esta abordagem, no entanto, não será utilizada neste trabalho.

A maioria dos modelos selecionados para representar os elementos da unidade de geração adaptam-se tanto para simulações de curto prazo como para simulações de longo prazo. A seguir descrevem-se os modelos selecionados para representar os elementos do diagrama da figura 4.1.

4.1.1. Máquinas Síncronas

As máquinas síncronas são representadas pelos modelos matemáticos normalmente utilizados em estudos de estabilidade transitória [38]. Estes modelos são classificados em 5 tipos [27,38], considerando-se para isso suas características construtivas (pólos lisos ou pólos salientes) e o tipo de efeitos que se deseja representar no modelo (transitório e/ou subtransitório). A seguir são descritos resumidamente os modelos representados neste trabalho. A descrição detalhada da modelagem utilizada para as máquinas síncronas em estudos dinâmicos de SEE é apresentada no apêndice A.

- **Modelo I - Clássico** : este é o modelo mais simples utilizado para representar máquinas síncronas. O modelo clássico é válido apenas para estudos da ordem do período da primeira oscilação, sendo inadequado para estudos de longa duração, onde necessita-se de uma representação mais detalhada para a máquina síncrona [27,38].

- **Modelo II - Máquina Síncrona de Pólos Salientes (Efeitos Transitórios)** : o modelo II é indicado para representar máquinas síncronas de pólos salientes quando não são considerados os efeitos subtransitórios devidos aos enrolamentos amortecedores. Este modelo é o mais simples que considera os efeitos transitórios para o campo, sendo adequado para uma faixa mais ampla de estudos que o modelo clássico.

- **Modelo III - Máquina Síncrona de Pólos Lisos (Efeitos Transitórios)** : o modelo III é adequado para representar máquinas de pólos lisos quando não são considerados os efeitos subtransitórios devido aos enrolamentos amortecedores.

- **Modelo IV - Máquina Síncrona de Pólos Salientes (Efeitos Subtransitórios)** : este modelo é adequado para representar máquinas síncronas de pólos salientes, onde os efeitos subtransitórios dos enrolamentos amortecedores são considerados.

- **Modelo V - Máquina Síncrona de Pólos Lisos (Efeitos Subtransitórios)** : o modelo V é adequado para representar máquinas síncronas de pólos lisos, onde os efeitos subtransitórios dos enrolamentos amortecedores são considerados.

- **Modelo Não-Convencional [5]** : este modelo foi desenvolvido especificamente para simulações de longo prazo onde os fenômenos rápidos podem ser desconsiderados. O modelo não-convencional não é indicado para simulações de estabilidade transitória.

Os modelos apresentados são válidos para simulações em que a velocidade da máquina síncrona não apresenta grandes desvios em relação a nominal ($w \approx 1.0$ pu). Para o intervalo de tempo dos estudos de estabilidade transitória esta hipótese é perfeitamente válida [38,49]. Entretanto em simulações de longa duração podem ocorrer desvios consideráveis na velocidade das máquinas síncronas. Isto impõe a adoção de modelos para as máquinas que representem este efeito em sua formulação. Neste trabalho, no entanto, os modelos utilizados consideram a velocidade da máquina síncrona próxima ao seu valor nominal.

4.1.2. Regulador de Tensão

Os modelos utilizados para reguladores de tensão foram selecionados da padronização IEEE proposta em [51,52]. Sendo estes adequados para representar a maioria dos reguladores de tensão atualmente em uso. Adicionalmente, foram representados dois modelos simplificados para reguladores de tensão. Uma descrição mais detalhada da modelagem adotada pode ser encontrada no apêndice A deste trabalho. Os modelos selecionados são :

- **Modelo IEEE Tipo 1 [51]** : este modelo é adequado para representar reguladores de tensão que possuem excitatrizes rotativas CC como fonte de tensão para o sistema de excitação.

- **Modelo IEEE ST-1 [52]** : este modelo é adequado para representar reguladores de tensão que possuem retificadores estáticos tiristorizados como fonte de tensão para o sistema de excitação.

- **Modelos Simplificados** : estes modelos representam o efeito do regulador de tensão através de uma função de transferência de 1º ordem e um limitador, sendo descritos a seguir.

- * **Modelo Simplificado 1** : neste modelo é mantida a característica dinâmica do regulador de tensão. Este modelo pode ser utilizado para representar reguladores de tensão que possuem somente elementos estáticos.

- * **Modelo Simplificado 2 [5]** : o modelo simplificado 2 desconsidera a dinâmica do regulador de tensão. Este modelo deve ser utilizado preferencialmente para estudos de longo prazo em que a dinâmica do regulador possa ser desconsiderada.

4.1.3. Estabilizador de Sistemas de Potência - ESP

Os estabilizadores de sistemas de potência são representados por dois modelos gerais. Estes modelos são adequados para representar grande parte dos ESPs atualmente em uso [53]. Os modelos diferem conforme o tipo de sinal adicional utilizado, sendo apresentados em detalhes no apêndice A. Os modelos representados são :

- *ESP derivado da Potência Elétrica ou Acelerante.*
- *ESP derivado da Velocidade ou Frequência.*

O efeito dos estabilizadores de sistemas de potência é mais destacado durante o período transitório do SEE, razão pela qual freqüentemente são desconsiderados em simulações de longo prazo.

4.1.4. Regulador de Velocidade

Os reguladores de velocidade possuem efeito mais destacado em estudos de longa duração. Assim, modelos suficientemente detalhados devem ser selecionados para representar estes elementos em simulações de longo prazo. Os modelos selecionados das referências [54,55] são descritos resumidamente a seguir e apresentados em detalhes no apêndice A deste trabalho. Será dado maior ênfase aos reguladores de velocidade para unidades de geração hidráulica.

- *Regulador de Velocidade para Turbinas Térmicas [54]* : o modelo selecionado para representar os reguladores de velocidade para as turbinas térmicas é o modelo geral proposto em [54]. Este modelo é adequado para representar a maioria dos reguladores utilizados em unidades de geração térmica.

- *Regulador de Velocidade para Turbinas Hidráulicas [54,55]* : os reguladores de velocidade para turbinas hidráulicas possuem um comportamento dinâmico diferente conforme o tipo do mecanismo de controle (controle mecânico-hidráulico ou elétrico-hidráulico). Assim foram selecionados três modelos para as turbinas hidráulicas das referências [54,55] :

- * *Modelo Geral* : este modelo é adequado para representar tanto reguladores de velocidade com controle mecânico-hidráulico como reguladores de velocidade com controle elétrico-hidráulico. O modelo geral é adequado para simulações de curta duração, em que se deseja representar o sistema de regulação de velocidade [54].

- * *Modelo com Controle Mecânico-Hidráulico* : este modelo é adequado para repre-

sentar reguladores de velocidade com controle mecânico-hidráulico em simulações de longa duração. Para estas simulações torna-se necessária a adoção de modelos mais detalhados que o modelo geral [55].

* *Modelo com Controle Elétrico-Hidráulico* : este modelo é adequado para representar reguladores de velocidade com controle elétrico-hidráulico em simulações de longa duração [55].

- *Regulador de Velocidade Simplificado [39]* : para unidades de geração em que os parâmetros do regulador de velocidade são desconhecidos pode ser utilizado um modelo de regulador muito simples. Neste modelo o único parâmetro necessário é a característica de regulação da unidade de geração.

4.1.5. Turbinas

Os efeitos do comportamento dinâmico das turbinas são mais destacados em simulações de longa duração, quando são significativos para o balanço Carga-Geração do SEE. Por esta razão, os simuladores de longo prazo necessitam de uma modelagem detalhada para estes elementos. Os modelos utilizados neste trabalho foram selecionados das referências [38,39,50,54,55,56, 57,58,59] sendo resumidamente descritos a seguir. A descrição detalhada dos modelos utilizados é apresentada no apêndice A.

- *Turbinas Térmicas [38,54,56,58]* : as turbinas térmicas são representadas pelo seu modelo geral, descrito em [54]. Este modelo tem sido amplamente utilizado para representar as turbinas térmicas em simuladores de curta e longa duração.

- *Turbinas Hidráulicas [38,50,54,55,57,60]* : em geral, a representação de turbinas hidráulicas nos estudos da dinâmica de SEE tem sido feita pelo seu modelo linearizado [54,55]. Entretanto, este modelo não é adequado para representar o comportamento dinâmico das turbinas hidráulicas em simulações de longa duração, onde um modelo com maior riqueza de detalhes é necessário. Neste trabalho foram selecionados dois modelos para representar as turbinas hidráulicas. O primeiro é o modelo linearizado [54,55] , e o segundo é um modelo não linear, selecionado de [55].

* *Modelo Linearizado* : o modelo linearizado é usualmente utilizado em simulações de curta duração, onde o efeito da turbina deve ser representado. A referência [55] sugere que a utilização do modelo linearizado seja evitada, uma vez que ele somente é válido para a

análise de pequenas perturbações em torno do ponto de equilíbrio.

* *Modelo Não-Linear* : os modelos não-lineares, propostos em [50,55,57,60], são os mais adequados para representar as turbinas hidráulicas em simulações de longa duração. O modelo não-linear selecionado representa turbinas hidráulicas considerando o efeito da coluna d'água no conduto forçado com uma pequena ou sem nenhuma chaminé de equilíbrio.

- *Turbinas a Gás [39,59,61]* : turbinas a gás não possuem modelos completamente definidos para representar seu comportamento em estudos de dinâmica de SEE. A dificuldade para obtenção de parâmetros e a inexistência deste tipo de turbina no sistema elétrico brasileiro levaram a seleção de um modelo bastante simplificado [39] para representar estas turbinas.

4.1.6. Caldeiras

Em estudos de longa duração não é possível sustentar a hipótese de que as unidades de geração térmica possuem disponibilidade infinita de vapor. Por esta razão, o comportamento dinâmico das caldeiras é significativo e deve ser considerado. Existem, basicamente, dois tipos de caldeiras : as Caldeira Tipo Tambor e as Caldeiras de Fluxo Direto. As caldeiras tipo tambor são as mais comumente utilizadas nas unidades térmicas, sendo selecionadas para utilização neste trabalho [39,63].

- *Caldeira Tipo Tambor [39,63]* : o modelo adotado para representar caldeiras do tipo tambor foi selecionado da referência [63]. Este modelo é apresentado em detalhes no apêndice A deste trabalho.

4.1.7. Reator Nuclear

A energia proveniente de unidades de geração termonucleares é cada vez mais importante nos modernos SEE. Por esta razão o comportamento dinâmico destas unidades deve ser considerado nas simulações da dinâmica de SEE, especialmente em simulações de longa duração. Existem dois tipos básicos de reatores nucleares sendo atualmente utilizados, o PWR ("*Pressurized Water Reactor*") e o BWR ("*Boiling Water Reactor*") [39,62,65,66,67,68]. A modelagem para estes reatores em simulações da dinâmica de SEE não é bem estabelecida, assim não existem modelos definitivamente aceitos para sua representação.

- *Reator Nuclear BWR [39,65,66,67,68]* : o reator nuclear do tipo BWR não será implementado neste trabalho. Entretanto, algumas descrições gerais deste tipo de reator nuclear

podem ser encontradas no apêndice A deste trabalho ou nas referências [39,62, 65,66,67,68].

- **Reator Nuclear PWR [62,65,66,67,68]** : poucos trabalhos apresentam modelos de reatores nucleares para estudos de simulação da dinâmica de SEE. Somente em [62] é apresentado um modelo completo para reatores do tipo PWR. Este modelo é apresentado em detalhes no apêndice A.

4.2. Modelagem dos Elementos da Rede Elétrica

Os principais elementos que formam a rede elétrica de um SEE são as linhas de transmissão, os transformadores com tap fixo e os elementos série controlados (FACTS e LTCs). As linhas de transmissão e os transformadores com tap fixo são representados através de modelos estáticos. Os elementos série controlados, no entanto, como transformadores LTC e dispositivos FACTS não podem ter seu comportamento dinâmico desprezado e devem ser representados por modelos dinâmicos. A modelagem utilizada para estes elementos é apresentada detalhadamente no apêndice A.

- **Linhas de Transmissão** : as linhas de transmissão são representadas pelo seu circuito equivalente π .

- **Transformadores** : a modelagem matemática geralmente utilizada para representar transformadores assume que a posição do tap não varia durante o intervalo de simulação. Esta consideração pode ser aplicada à estudos de curta duração. Entretanto, em simulações de longa duração a ação do mecanismo de variação automática dos taps deve ser considerada. Por esta razão, são propostos dois modelos para representar transformadores, o primeiro considerando tap fixo [24,69] e o segundo considerando o mecanismo de variação automática dos taps [70,71]. Transformadores defasadores não são representados neste trabalho.

- * **Transformadores com tap fixo [69]** : a representação geral de transformadores com tap fixo consiste, basicamente, de uma impedância em série com um transformador ideal [69]. Assim o modelo de transformador adotado pode ser representado por um circuito equivalente π .

- * **Transformadores com tap variável - LTC [70,71]** : os transformadores LTCs contribuem para a manutenção do nível de tensão do SEE através da variação da posição dos taps, sendo este controle realizado, durante a simulação, através do mecanismo de variação automática dos taps do transformador. Maiores detalhes do modelo adotado podem ser encontra-

dos no apêndice A ou nas referências [70,71].

4.3. Modelagem das Cargas

Para estudos de estabilidade transitória os modelos mais utilizados para representarem o comportamento das cargas assumem que esta varia unicamente devido a alterações na tensão da barra terminal (através de uma função polinomial ou exponencial) [38,72,73]. Estas hipóteses, no entanto, não são adequadas para estudos de longa duração, uma vez que não consideram a variação da potência nominal da carga no intervalo de tempo simulado, devido a alterações na demanda da carga que está sendo representada. Assim, o modelo comumente utilizado para representar este efeito descreve o comportamento da carga segundo uma curva discretizada ao longo do intervalo de simulação [7,8]. A seguir são apresentados os modelos de carga utilizados neste trabalho. Todos os modelos selecionados foram adaptados para incluir os efeitos da variação da frequência do SEE. Esta adaptação é particularmente importante quando o desbalanço entre carga e geração é significativo ou em estudos de ilhamento do SEE [73]. Detalhes da modelagem utilizada para as cargas podem ser encontradas no apêndice A.

- **Modelo Polinomial** : este modelo considera o relacionamento entre a carga-tensão e carga-frequência na barra segundo uma equação polinomial, geralmente de segundo grau.
- **Motores de Indução [38,75,76,77,78,79]** : historicamente os motores de indução foram as primeiras cargas dinâmicas a serem modeladas. O modelo adotado para representar motores de indução é descrito por três equações diferenciais, sendo apresentado em detalhes no apêndice A.
- **Modelo Agregado Dinâmico de Carga [42]** : os estudos dinâmicos de Estabilidade de Tensão impulsionaram o desenvolvimento de novos modelos dinâmicos para as cargas [42,74,77,78]. Estes modelos procuram representar a resposta dinâmica típica de um agregado de cargas frente a um degrau de tensão na barra.
- **Curva de Carga** : para estudos de longa duração não é possível sustentar a hipótese de que a potência nominal da carga permanece inalterada ao longo do intervalo de simulação. A maneira mais adequada para representar este comportamento da carga é através da utilização de curvas de carga pré-determinadas [7,8]. Assim, o modelo adotado para representar uma curva de carga no SEE descreve a demanda média da carga, em intervalos discretos, durante um determinado período de tempo.

4.4. Equipamentos FACTS

O desenvolvimento da tecnologia em eletrônica de alta potência permitiu a introdução de uma série de novos equipamentos controláveis nos SEE. Tais equipamentos foram genericamente denominados de dispositivos FACTS (“*Flexible AC Transmission Systems*”) e, devido a sua alta velocidade de atuação e a um sistema de controle digital, podem contribuir significativamente para o desempenho dinâmico dos SEE [53]. A elevada velocidade de atuação destes equipamentos torna-os mais significativos em simulações de curto prazo. Entretanto, em estudos de longa duração a atuação destes dispositivos, para o controle dos níveis de tensão do SEE e do fluxo de potência das linhas de transmissão, deve também ser considerada. Os modelos adotados para representar os FACTS são descritos resumidamente a seguir :

- **Compensador Estático de Reativos (CER)** : o modelo selecionado para representar os compensadores estáticos de reativos constitui-se, genericamente, por uma susceptância controlável em derivação na barra, permitindo controlar a potência reativa injetada nesta barra [53,80].
- **Capacitor Série Controlado (CSC)** : os capacitores série controlados, diferentemente dos compensadores estáticos de reativos, são instalados em série na rede elétrica dos SEE. A disposição destes elementos em série com os ramos da rede elétrica permite controlar o fluxo de potência ou a corrente nestes ramos, geralmente uma linha de transmissão [53].

4.5. Controle Automático da Geração (CAG)

O controle de velocidade fornecido pelo sistema primário de regulação de velocidade não elimina completamente os desvios na frequência do SEE quando ocorrem variações na carga. Um aumento da carga é compensado pelo aumento da geração através da ação dos reguladores de velocidade e pelo decréscimo da carga com a frequência. Assim a demanda é atendida às custas de um desvio na frequência do SEE. Esta característica é necessária afim de conseguir uma adequada divisão de carga entre as unidades de geração do SEE [53,87]. Um sistema secundário de regulação de velocidade é então necessário para eliminar os desvios de frequência no SEE [53]. Este sistema denomina-se Controle Automático da Geração (CAG). O modelo adotado para representar o CAG nas simulações de longo prazo é descrito no apêndice A deste trabalho.

4.6. Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas resumidamente as características gerais dos modelos matemáticos utilizados neste trabalho para representar os elementos do SEE em simulações de sua dinâmica. Esses modelos foram selecionados de diversas referências, sendo que a grande maioria são descritos nestas referências como válidos tanto para simulações de estabilidade transitória quanto para simulações de longo prazo. Entretanto, para simulações de longo prazo ainda deve ser feita uma revisão mais rigorosa, uma vez que nestes tipos de estudos, podem ocorrer diversos fenômenos que não foram considerados na formulação original de alguns dos modelos apresentados. Um exemplo característico disto é a avaliação do efeito causado por variações significativas de frequência nos parâmetros dos elementos que compõem a rede elétrica, cargas dinâmicas e máquinas síncronas.

No processo de seleção da modelagem verifica-se a existência na literatura de uma grande diversidade de modelos para representar os mais diversos equipamentos do SEE. Isto evidencia a necessidade da utilização de técnicas adequadas de programação para a implementação de um programa de simulação da dinâmica de SEE. Tais técnicas devem flexibilizar a adição de novos modelos ou equipamentos à estrutura computacional implementada.

CAPÍTULO 5

ESTRUTURA COMPUTACIONAL ORIENTADA A OBJETOS

Em programas de simulação da dinâmica de SEE freqüentemente são necessárias alterações no código do programa devido, principalmente, a inclusão ou adequação a novos modelos. As linguagens de programação comumente utilizadas nestas aplicações (FORTRAN) apresentam dificuldades quanto a manutenção e atualização dos programas. Além disto, códigos escritos em FORTRAN tendem a se tornar confusos para programas de médio e grande porte. Isto agrava-se após diversas atualizações e manutenções nestes códigos, sobretudo se tais atualizações são feitas por diferentes programadores. Neste sentido, fazem-se necessárias técnicas de programação que permitam uma eficiente implementação e atualização de programas de médio e grande porte.

Recentemente um novo paradigma de programação surgiu para suprir as deficiências encontradas pelas linguagens de programação convencionais. Este paradigma denominou-se Programação Orientada a Objetos, onde a linguagem C++ tem se destacado como ferramenta para estas aplicações.

Neste capítulo, inicialmente, descrevem-se as características gerais da Programação Orientada a Objetos, seus objetivos e conceitos básicos. Uma estrutura computacional orientada a objetos é, então, proposta para representar os elementos do SEE. Esta estrutura embora particu-

larmente adaptada para utilização em simuladores de SEE, é genérica o suficiente para ser utilizada em qualquer aplicação de SEE. Na parte final deste capítulo é apresentada uma estrutura matricial orientada a objetos para representar matrizes esparsas, com a descrição detalhada de sua implementação.

5.1. Programação Orientada a Objetos

A grande maioria dos programas aplicativos utilizados em SEE ainda estão baseados na primeira geração das linguagens de programação de alto nível, desenvolvidas nos anos 50 e 60 [21]. Apesar do elevado grau de aprimoramento das metodologias para as linguagens convencionais, estas apresentam dificuldades quanto a manutenção e atualização dos programas, uma vez que pequenas alterações tendem a se propagar por todo o programa. Esta tendência agrava-se a medida que cresce o tamanho e a complexidade dos programas.

O surgimento de novas técnicas e linguagens de programação, principalmente a partir dos anos 80, permitiu a implementação de programas com um alto grau de complexidade, sem perda de legibilidade do código. Dentre estas novas metodologias de programação, a Programação Orientada a Objetos (POO) surgiu como uma alternativa para os problemas associados ao desenvolvimento, manutenção e atualização de programas computacionais de grande porte [83]. A linguagem de programação C++ tem se destacado como ferramenta para aplicações da POO e apresenta tanto as características da POO quanto facilidades relativas a eficiência e portabilidade do código escrito [83].

Em programas de simulação da dinâmica de SEE são necessárias constantes atualizações e modificações no código do programa em virtude, principalmente, da inclusão de novos modelos para os equipamentos (reguladores de tensão e velocidade, dispositivos FACTS, estabilizadores, etc). Além disto, freqüentemente, novas técnicas e alternativas de controle para o SEE necessitam serem testadas e avaliadas, resultando novamente em modificações no código do programa. Estas características salientam a necessidade da utilização de técnicas de programação que permitam uma fácil atualização e expansão dos programas de simulação de SEE, sem que excessivas alterações no código anteriormente desenvolvido sejam necessárias.

Recentemente tem crescido bastante a utilização da POO à problemas de SEE, podendo ser encontradas aplicações em fluxo de potência [2,21,23], operações com matrizes esparsas [2,21,23], interfaces homem-máquina [22,84], configuradores de rede [84] e simulação da di-

nâmica [1]. Nestas aplicações encontram-se referências a problemas de eficiência computacional [21,23], salientando-se que para uma eficiente utilização desta técnica é necessário uma revisão nas metodologias usualmente utilizadas com as linguagens e técnicas convencionais. De fato, a POO, juntamente com a linguagem C++, trouxe uma nova e mais eficiente maneira de representar um problema, de tal forma que as já consagradas técnicas de programação devem ser reavaliadas para explorar ao máximo os novos conceitos de programação introduzidos [83].

A seguir são descritos os conceitos básicos da POO a fim de uniformizar nomenclaturas e terminologias comuns desta nova metodologia de programação. Tais conceitos são utilizados intensivamente na descrição da estrutura computacional que representa os elementos do SEE.

5.1.1. Conceitos Básicos

O surgimento das linguagens de concepção moderna (C, C++, Pascal, ADA, etc) juntamente com a POO introduziram novos conceitos e nomenclaturas no ambiente de programação.

A seguir são apresentados os principais conceitos introduzidos com as linguagens de última geração e com a POO. Estes conceitos são de fundamental importância para o entendimento da estrutura orientada a objetos definida para representar o SEE. É interessante salientar que uma abordagem rigorosa do tema não é objetivo deste trabalho, podendo ser encontrada na referência [83].

5.1.1.1. Listas Encadeadas e Alocação Dinâmica de Memória

A utilização de listas encadeadas alocadas dinamicamente na memória do computador é talvez uma das mais importantes evoluções introduzidas pelas linguagens modernas. O seu uso permite que um programa se adapte fielmente à dimensão do problema, alocando apenas a memória necessária a sua execução e ao armazenamento dos dados [83]. Esta técnica evita o dimensionamento prévio de enormes vetores onde, dependendo do tamanho do sistema em estudo, apenas alguns elementos são efetivamente utilizados. Além disto, a utilização de vetores impõe uma elevada rigidez à dimensão máxima do problema que o programa suporta, o que não ocorre com o uso de listas encadeadas alocadas dinamicamente.

O custo pago pela flexibilidade alcançada com o uso das listas encadeadas é a perda da indexação direta dos elementos da lista, sendo utilizada uma indexação elemento a elemento. Esta indexação tende a reduzir a velocidade de processamento quando buscas muito freqüentes e aleatórias são necessárias. Entretanto, técnicas alternativas para aceleração do processo de

busca podem ser utilizadas, minimizando bastante esta deficiência.

Salienta-se que a utilização de listas encadeadas e de alocação dinâmica de memória pertence ao conjunto de facilidades fornecidas pelas linguagens modernas, não pertencendo especificamente a POO.

5.1.1.2. Encapsulação de Dados e Mensagens

A maioria das linguagens de programação procedurais (linguagens estruturadas) utiliza uma metodologia baseada em uma base de dados passiva e várias subrotinas ou procedimentos que atuam sobre esta base de dados, ou seja, as subrotinas são os elementos ativos. A POO inverteu esta filosofia, os dados passaram a ser os elementos ativos, uma vez que possuem as subrotinas que os manipulam contidas em sua própria estrutura [83]. Esta filosofia de agrupamento em uma estrutura única para dados e subrotinas denomina-se Encapsulação de Dados, e é a principal característica da POO.

Os dados e subrotinas, agora encapsulados em uma estrutura única, comunicam-se com o mundo exterior através de mensagens. Sempre que uma mensagem é recebida e identificada como válida, a estrutura executa uma tarefa sobre os seus dados internos. Desta forma, a comunicação através de mensagens evita que o programa interfira nos dados de uma estrutura sem o conhecimento da própria estrutura, o que elimina os conhecidos “efeitos colaterais” quando alterações são feitas no código do programa.

5.1.1.3. Objetos, Classes, Mensagens e Métodos

O elemento básico da POO é o *Objeto*. Um objeto pode ser entendido como uma entidade lógica na memória do computador que representa um elemento físico real. Desta forma, os objetos armazenam em sua estrutura os dados que descrevem este elemento físico e um conjunto de subrotinas (métodos dentro da filosofia da POO) para manipulá-los, realizando uma tarefa específica.

A declaração da estrutura que caracteriza um tipo específico de objeto denomina-se *Classe*. Os protocolos de comunicação do objeto com o mundo exterior, declarados na classe, denominam-se *Mensagens*, onde para cada mensagem haverá sempre um *Método* correspondente. Os métodos definem todas as tarefas que o objeto está habilitado a realizar, ou seja, são os elementos ativos dentro de um objeto [1,83]. A utilização de um exemplo simples ilustra melhor estes conceitos e definições. Assim, poderia se definir um polígono como sendo um ob-

jeto, onde as coordenadas dos vértices do polígono seriam os dados e os métodos seriam as sub-rotinas definidas para manipular estes dados, como o cálculo da área ou do perímetro do polígono.

5.1.1.4. Polimorfismo e Herança

Polimorfismo representa a capacidade de vários objetos diferentes possuírem métodos com o mesmo nome (mensagens idênticas), geralmente associados a uma tarefa semelhante. Isto permite uma padronização das mensagens com a mesma finalidade para objetos distintos, facilitando a legibilidade do código escrito [83]. Um exemplo claro disto é a definição de um método para o cálculo da área de um polígono. Tanto para o objeto Triângulo, quanto para o objeto Retângulo, a mensagem será igual (por exemplo *CalcArea*), porém cada objeto terá uma implementação diferente para este método.

A *Herança* é a capacidade do objeto herdar todas as características de um objeto antecessor (que lhe deu origem). A herança torna possível a especialização de objetos descendentes através da inclusão de novas características a este objeto [83]. O processo de herança define uma hierarquia de objetos, todos descendendo e herdando as características do seu objeto antecessor. Isto permite uma eficiente reusabilidade dos objetos por outros programas, sendo necessário apenas adicionar as características pertinentes a nova aplicação.

5.1.1.5. Abstração de Dados

A POO permite implementar um tipo abstrato de objeto¹, onde são definidas apenas as características gerais deste objeto, sem implementação de código [21]. Para o exemplo anterior, um objeto abstrato polígono teria apenas a declaração das mensagens (por exemplo *CalcArea*, *CalcPerim*). Este objeto abstrato será usado como base para a criação dos demais objetos através do mecanismo da herança (Triângulo, Retângulo, etc). A implementação do código relativo aos métodos abstratamente definidos no objeto geral será feita somente para os objetos descendentes, individualizando assim o objeto descendente.

Um objeto abstrato define apenas “o que fazer” deixando os objetos descendentes implementarem o “como fazer” [83]. O conceito de abstração de dados define uma padronização para as interfaces de objetos correlacionados, permitindo que um programa seja escrito sem o conhecimento detalhado das partes que o compõem.

¹ : A denominação “objeto abstrato” não existe na POO, sendo o mais correto “classe abstrata”. Entretanto, para melhor ilustrar o conceito de Abstração de Dados a leitores não familiarizados com o assunto preferiu-se esta denominação.

5.2. Modelagem Orientada a Objetos dos Elementos do SEE

A aplicação da POO à modelagem dos elementos do SEE traz uma nova maneira de abordar este problema, uma vez que integra os parâmetros, variáveis do modelo e a resolução de suas equações diferenciais em uma estrutura única. Assim, a metodologia comumente empregada nos programas de simulação escritos em FORTRAN, onde as equações diferenciais do SEE são resolvidas como um todo, passa a ser substituída por uma nova metodologia, baseada na resolução das equações diferenciais individualmente para cada elemento do SEE. Esta nova metodologia tende a acomodar o aumento da complexidade do programa dentro dos objetos individuais, tornando os programas extremamente legíveis, modulares e flexíveis. Os objetos que representam os equipamentos do SEE devem ser então absolutamente independentes e auto contidos, como são os equipamentos físicos reais.

Assim, um conjunto de objetos foi proposto para representar os elementos do SEE, sendo este a base de dados do programa. O requisito do desempenho computacional impõe uma cuidadosa elaboração da estrutura orientada a objetos, uma vez que o desempenho computacional de um programa é fortemente dependente de uma eficiente interação entre a estrutura de dados e o algoritmo que a utiliza, de tal forma que uma estrutura de dados ineficiente pode reduzir drasticamente o desempenho global do programa. Neste sentido, a estrutura de dados orientada a objetos proposta procura utilizar eficientemente particularidades do problema da simulação da dinâmica de SEE, visando melhorar o desempenho computacional do programa. No entanto esta estrutura deve ainda ser genérica e flexível o suficiente para ser utilizada em outros problemas de SEE.

Os primeiros trabalhos que aplicaram a POO à SEE utilizaram uma estrutura fortemente hierarquizada para os elementos do SEE [2,21,23,84]. Todas as classes implementadas (barras, ramos, cargas, etc) descendiam de uma classe base comum. Obviamente esta classe base deveria ter características comuns a todos os seus descendentes. A figura 5.1 ilustra a estrutura comumente utilizada nas aplicações de POO à SEE, onde observa-se uma estrutura altamente hierarquizada.

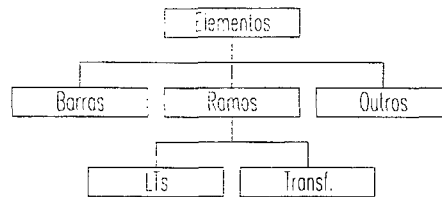


Figura 5.1 - Estrutura comumente utilizada em aplicações de POO

Neste trabalho optou-se por individualizar os principais elementos do SEE em várias classes base, uma vez que existem poucas características comuns entre estes elementos que justifiquem a adoção de um elemento base único. De fato, o grande número de tipos diferentes de equipamentos em um SEE praticamente elimina a característica comum entre estes elementos, necessária à definição de uma classe base. Por outro lado, várias classes base podem ser adotadas para a definição de grupos de equipamentos, conforme ilustra a figura 5.2. A herança efetua-se a partir destas classes, ocorrendo somente para elementos diretamente relacionados às classes base.

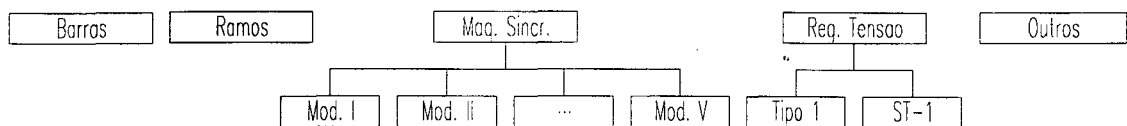


Figura 5.2 - Estrutura proposta para representar o SEE

A metodologia utilizada representa melhor a estrutura física real dos elementos de um SEE, individualizando os equipamentos como objetos próprios e independentes. Esta metodologia contribui para aumentar a legibilidade do programa desenvolvido. A seguir são apresentados os modelos computacionais utilizados para representar os elementos do SEE.

5.2.1. Barra

Em um SEE real a Barra é o elemento físico que fornece os pontos de conexão para os diversos equipamentos do SEE (linhas de transmissão, máquinas síncronas, cargas, reatores, etc). Além disto, o conjunto das tensões em todas as barras do SEE definem o estado de operação da rede elétrica.

Dentro da filosofia da programação orientada a objetos, a estrutura computacional proposta para representar a barra deve reproduzir as características apresentadas acima, ou seja, o

objeto barra deve simplesmente fornecer um ponto de conexão para os demais elementos do SEE, definindo o estado de operação da rede elétrica pela sua tensão complexa. Para viabilizar as características impostas ao objeto barra são definidos dois mecanismos especiais de conexão aos elementos do SEE : conexões à rede elétrica e conexões aos demais elementos (elementos externos).

5.2.1.1. Conexões à Rede Elétrica

A conexão de uma barra com a rede elétrica é feita através dos ramos do SEE, onde a denominação ramo é atribuída a todos os elementos série da rede elétrica, tais como linhas de transmissão, transformadores, dispositivos FACTS série, etc. Assim, cada objeto barra geralmente está conectado a vários objetos ramos simultaneamente, o que torna necessário a adoção de uma estrutura dinâmica de dados, interna ao objeto barra, responsável pelas conexões desta barra aos objetos ramos da rede elétrica. Esta técnica adiciona flexibilidade na manipulação das conexões da barra permitindo que esta ajuste-se ao número exato de conexões que existem na barra. A figura 5.3 ilustra o mecanismo de conexão do objeto barra aos ramos da rede elétrica, onde observa-se claramente que os elementos responsáveis pela conexão do objeto barra aos objetos ramos (*Conexões da Barra*) estão organizados na forma de uma lista encadeada alocada dinamicamente. Esta estrutura deve ser mantida e gerenciada internamente pelo objeto barra.

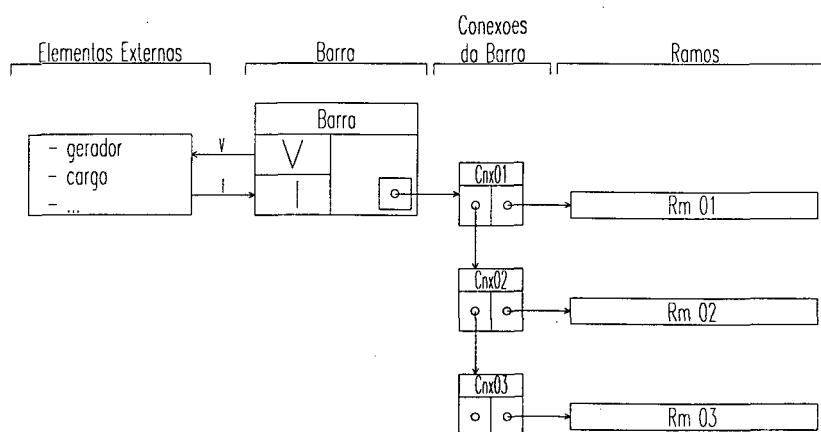


Figura 5.3 - Mecanismos de Conexões das Barras

A estrutura definida para o gerenciamento das conexões informa quais ramos estão conectados à barra, ou seja, existe uma conexão direta das barras com os ramos.

5.2.1.2. Conexões aos demais elementos

A conexão do objeto barra com os demais elementos do SEE (máquinas síncronas, cargas, reatores, etc) é realizada de maneira indireta, através das variáveis públicas V e I (tensão e corrente complexa, respectivamente). A utilização destas variáveis estabelece um fluxo de informações entre os elementos do SEE e as barras, onde os elementos acessam o estado atual de operação da barra (V) e com base nesta informação atualizam a injeção de corrente na barra (I). Desta forma o objeto barra desconhece completamente quais elementos externos estão conectados, sentindo apenas seus efeitos pela alteração da corrente complexa injetada. Obviamente, tais elementos devem ser representados por uma injeção de corrente equivalente na barra. A figura 5.3 ilustra a conexão dos elementos do SEE à barra (*Elementos Externos*) e o fluxo de informações estabelecido.

O fragmento de código abaixo descreve resumidamente a implementação do objeto barra em suas partes principais.

```
class Barra {
    // - Descrição -
    int num, tip, area;
    // - Conexão aos Elementos Externos -
    complex V, I;
    float freq;
    // - Conexão à Ybarra -
    complex Yii;
    celmat *PtrYii;
    .....
    // - Conexão aos Ramos -
    conex *IndxConex, *PtrConex;
    // - Lista de Barras Duplamente Encadeada -
    Barra *PtrAntr, *PtrProx;
    // - Construtor -
    Barra ( char *StrBarra );
    // - Gerenciamento das Conexões -
    void IniConex ( void );
    void AddConex ( Ramo *PtrRamo );
    void MovConex ( void );
    void BarConex ( void );
    void YijConex ( void );
    // - Cálculo da Frequência na Barra -
    void CondInic ( void );
    void DetermFreq ( void );
}
```

Alguns outros aspectos podem ainda serem salientados com relação ao objeto barra :

- os objetos barra são armazenadas na memória do computador utilizando uma estrutura de lista duplamente encadeada [83] através de alocação dinâmica de dados (- *Lista de Barras Duplamente Encadeada* -). Esta estrutura é particularmente adequada para acelerar o processo

de solução das equações da rede elétrica, como será mostrado posteriormente;

- os objetos barra possuem um mecanismo especial de conexão aos elementos diagonais da matriz admitância nodal do sistema (- *Conexão à Ybarra* -), visando aumentar a velocidade da solução das equações da rede elétrica;
- os objetos barra armazenam internamente o valor da sua admitância própria (Y_{ii}), sendo esta uma variável pública que pode ser alterada pelos elementos conectados quando alterações na topologia do SEE ou distúrbios forem efetuados;
- por motivos de simplificação de notação a variável pública *freq* foi omitida da figura 5.3. Entretanto esta variável representa a frequência de operação da barra e pertence ao conjunto de variáveis públicas que podem ser acessada pelos elementos externos do SEE.

A estrutura computacional definida para representar a barra é flexível e genérica o suficiente para ser utilizada na maioria das aplicações em SEE.

5.2.2. Ramos

A classe ramo consiste da representação computacional para as linhas de transmissão, transformadores e demais equipamentos série que possam ser descritos por circuitos π equivalentes. Cada ramo define a interconexão entre duas barras da rede elétrica. O conjunto de todos os ramos define então a interconectividade de toda a rede elétrica do SEE.

O fragmento de código abaixo descreve a implementação da classe ramo.

```
class Ramo {  
    // - Conexão com as Barras -  
    int    Bar01, Bar02;  
    Barra *PtrBar01, *PtrBar02;  
    // - Parâmetros -  
    float  R, X, B;  
    float  tap, tapmin, tapmax;  
    int    circ, area;  
    // - Modelo  $\pi$  -  
    complex Yser, Ysh01, Ysh02;  
    .....  
    // - Métodos -  
    complex CalcFluxo ( void );  
}
```

Os objetos ramo possuem mecanismos especiais de conexão aos objetos que representam suas barras terminais, definindo uma estrutura de interconectividade entre os ramos e as barras (através dos apontadores *PtrBar01* e *PtrBar02* do fragmento de código acima) [23], e entre as barras e os ramos (ver item 5.2.1.1 - Conexões à rede elétrica). Esta estrutura de inter-

conectividade formada pelas conexões dos objetos barra aos objetos ramo, e vice-versa, constituem uma rede lógica na memória do computador que simula as conexões entre barras e ramos da rede física real, conforma ilustra a figura 5.4.

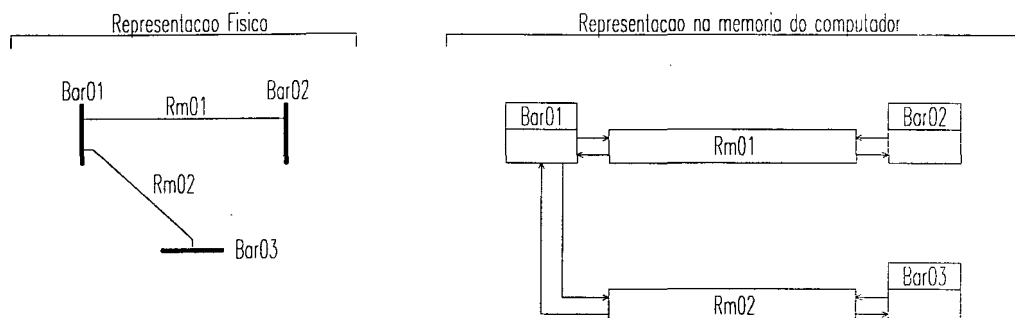


Figura 5.4 - Conectividade da Rede Elétrica

O esquema adotado para representar as interconexões entre os elementos da rede elétrica proporciona agilidade e eficiência na manipulação destes elementos. Com esta estrutura é possível acessar dados, das barras adjacentes a uma determinada barra, diretamente através da estrutura do objeto ramo.

5.2.2.1. Elementos Série

O objetos ramos foram implementados para representar qualquer elemento série no SEE, desde que este elemento possa ser representado, em regime permanente, por um circuito π equivalente. Algumas particularidades e considerações sobre os elementos série do SEE devem ser salientadas.

- **Linhas de Transmissão** : os parâmetros usuais das linhas de transmissão (R , X e B) estão incluídos dentro da própria estrutura do objeto ramo (ver - *Parâmetros* - na definição da classe ramo). Desta forma, não existem objetos próprios para as linhas de transmissão, estando sua estrutura contida no interior dos objetos ramos;

- **Transformadores** : o procedimento adotado na representação dos transformadores com tap fixo é semelhante ao utilizado para as linhas de transmissão, ou seja os parâmetros do transformador (*tap*, *tapmax* e *tapmin*) estão incluídos na própria estrutura do objeto ramo (ver *Parâmetros* na definição da classe ramo);

- **Transformadores LTC** : os transformadores LTC (transformadores com tap variável) são compostos basicamente por duas parcelas (ver item 4.2.2.2), uma parcela estática definida por um objeto ramo simples, e uma parcela que representa a sua dinâmica definida por um ob-

jeto independente porém associado ao objeto ramo. O objeto que define a parcela dinâmica controla o mecanismo de variação do tap no LTC, utilizando a estrutura de conexão do objeto ramo associado para atualizar as injeções de corrente de compensação nas barras terminais do ramo. A figura 5.5 ilustra as duas parcelas dos LTCs, onde o elemento *LTC01* representa o objeto que define a parcela dinâmica e o elemento *Rm01* representa o objeto ramo que define a parcela estática do LTC;

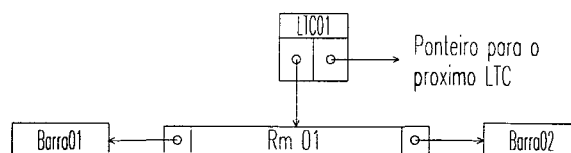


Figura 5.5 - Estrutura computacional definida para os transformadores LTCs

- ***Demais elementos série*** : os demais elementos série do SEE são tratados de maneira semelhante aos elementos descritos acima, ou seja, se o elemento é puramente estático (não altera seus parâmetros ao longo da simulação) é tratado como um ramo simples da rede elétrica, caso contrário, sua parcela estática é tratada como um ramo e sua parcela dinâmica como um objeto associado a este ramo (ver capítulo 4, item 4.2.3).

5.2.3. Cargas

A estrutura computacional desenvolvida para representar as cargas proporciona a possibilidade de representar três diferentes tipos básicos de modelos. Os modelos básicos são : um modelo estático (polinomial), dois modelos dinâmicos (motores de indução ou modelos agregados de carga) e um modelo que representa a variação da carga no tempo (curva de carga). A carga pode então ser representada por cada um destes modelos isoladamente, ou através de uma composição dos modelos definindo um comportamento agregado para a carga total da barra.

Todos os modelos de carga são representados por equivalentes Norton, sendo estes superpostos quando a carga é representada por uma composição de modelos. Assim o efeito da carga reflete-se na rede elétrica através de uma injeção de corrente equivalente e uma admitância em derivação na barra que pode ser adicionada à diagonal da matriz admitância nodal contribuindo para melhorar o seu condicionamento.

O fragmento de código a seguir ilustra a composição dos modelos na classe carga.

```
class Carga {  
    // - Conexão a Barra -  
    Barra *PtrBar;  
    // - Parâmetros -  
    float Pnom, Qnom;  
    // - Modelo Polinomial -  
    float ap, bp, cp, aq, bq, cq;  
    // - Modelo Dinamico -  
    CargDin *PtrCargDin;  
    // - Curva de Carga -  
    int crv;  
    CrvCarg *PtrCrvCarg;  
    // - Conexão com a Barra -  
    complex V, Ieq, Yeq;  
    .....  
    // - Métodos -  
    void CondInic ( void );  
    real SolucEquac ( word iter );  
    void AtualizIbar ( void );  
    void AtualizYdiag ( void );  
}
```

O objeto carga, assim como todos os elementos externos, possui uma conexão direta com o objeto barra à qual está conectado logicamente (através do apontador *PtrBar*). Esta conexão possibilita o fluxo de informações diretamente entre os objetos carga e barra (*V*, *Ieq* e *Yeq*).

As estruturas computacionais que representam os modelos básicos de carga possuem algumas particularidades que devem ser devidamente salientadas :

- **Modelo Polinomial** : os parâmetros do modelo polinomial relativos às parcelas de potência, corrente e impedância constante são definidos dentro da própria estrutura do objeto carga. Desta forma o modelo polinomial não possui objeto próprio, estando contido no interior do objeto carga;

- **Cargas Dinâmicas** : as cargas dinâmicas podem ser de dois tipos distintos : motores de indução ou modelos agregados dinâmicos (ambos derivados de uma classe base única). Os modelos dinâmicos possuem classes próprias, onde são definidos seus parâmetros e métodos. Entretanto, cabe ao objeto carga controlar o envio das mensagens aos objetos que representam os modelos dinâmicos, bem como a composição da injeção de corrente equivalente total e da admitância equivalente que definem o fluxo de informações para a barra;

- **Curva de Carga** : a curva de carga possui um tratamento semelhante às cargas dinâmicas, ou seja, possui um objeto próprio, porém é totalmente controlado pelo objeto carga. O objeto Curva de Carga apenas informa, quando solicitado, o novo valor do fator de multiplicação para as potências nominais originais da carga.

5.2.4. Unidades de Geração

Uma unidade de geração pode ser definida como o agrupamento de vários elementos interagindo no sentido de suprir uma determinada demanda de carga. A disposição dos elementos básicos que compõem a unidade de geração e o fluxo de informações responsável pela interação entre estes elementos pode ser visualizada na figura 5.6.

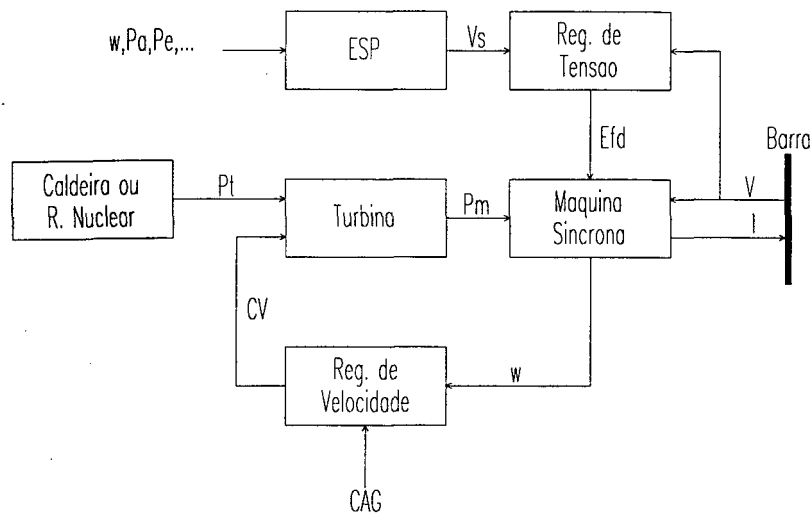


Figura 5.6 - Representação da Unidade de Geração

Cada bloco funcional da unidade de geração possui vias de comunicação muito bem definidas com os demais blocos, conforme ilustra a figura 5.6. Além disto, tais vias são independentes do modelo matemático que será utilizado para representar os elementos. Este tipo de estrutura é particularmente adequada à filosofia da POO, uma vez que cada bloco funcional pode ser representado por um objeto independente, com parâmetros e métodos bem definidos.

Pode-se então definir classes abstratas base para cada elemento que compõe a unidade de geração, padronizando suas interfaces e variáveis de comunicação. As classes abstratas são utilizadas para declarar os protocolos para o envio de mensagens e as variáveis de comunicação dos seus elementos descendentes. Assim, qualquer elemento derivado de uma classe base, obrigatoriamente, deve utilizar a interface declarada. Obviamente que a definição dos parâmetros e a implementação dos métodos será diferenciada para cada elemento descendente da classe base, onde os elementos descendentes correspondem aos modelos específicos dos elementos da unidade de geração. Isto permite que um programa seja escrito utilizando apenas a interface declarada em uma classe base, independente do elemento derivado que realmente estará sendo utili-

zado durante a execução do programa.

Definidas as interfaces para cada bloco funcional, uma classe unidade de geração (*class UnidGer*) pode ser implementada para agrupar, em uma estrutura única, todos os objetos que representam seus elementos componentes. Esta classe tem a função específica de gerenciar, de maneira ordenada, o envio de mensagens para os elementos que a compõe. A classe unidade de geração controla tais elementos utilizando somente a interface definida nas classes abstratas bases correspondentes a estes elementos. O fragmento de código abaixo ilustra a definição da classe unidade de geração, onde é possível visualizar a definição dos seus elementos componentes e dos métodos para controle do envio de mensagens a estes elementos. A implementação do método *SolucEquac* também é apresentada.

```
class UnidGer {
    // - Identificação -
    int  num, Barra;
    int  Unid, NumUnids;
    // - Elementos Componentes -
    Maq   *PtrMaq;
    Turb   *PtrTurb;
    RegVel *PtrRegVel;
    RegTens *PtrRegTens;
    PSS    *PtrPSS;
    Cald   *PtrCald;
    .....
    // - Métodos -
    void  CondInic   ( void );
    float SolucEquac ( void );
}

// - Implementação do Método SolucEquac -
void UnidGer::SolucEquac ( void ) {
    PtrRegVeloc -> SolucEquac ( );
    PtrCald      -> SolucEquac ( );
    PtrTurb      -> SolucEquac ( );
    PtrPSS       -> SolucEquac ( );
    PtrRegTens   -> SolucEquac ( );
    PtrMaq       -> SolucEquac ( );
}
```

A utilização de classes abstratas base para a definição dos elementos que compõem a unidade de geração permite que a classe unidade de geração seja completamente desenvolvida sem que as classes derivadas dos elementos base estejam totalmente implementadas. Esta característica é particularmente adequada à inclusão de novos modelos para os elementos da unidade de geração (descendentes das classes bases), uma vez que não requer nenhuma alteração na classe unidade de geração ou em qualquer parte do programa que a utilize.

5.2.4.1. Máquina Síncrona

O fluxo de informações existente de uma máquina síncrona à rede elétrica e aos seus controladores é representado através das variáveis públicas de comunicação V , I , P_m , E_{fd} e w independentemente do modelo que está sendo utilizado para representar a máquina síncrona ou os controladores, conforme pode ser visualizado na figura 5.6.

Por esta razão, pode-se utilizar uma classe abstrata base para representar as máquinas síncronas, onde as variáveis de comunicação e os protocolos para o envio de mensagens são padronizados para todas as classes descendentes. A utilização e as vantagens das classes abstratas base, para representar os elementos da unidade de geração, foram salientadas na descrição da classe unidade de geração.

O fragmento de código abaixo descreve a classe abstrata máquina síncrona.

```
class Maq {
    // - Identificação -
    int num;
    // - Conexão a Barra -
    Barra *PtrBar;
    // - Comunicação aos demais Elementos -
    complex I, V;
    float Pm, Efd, w;
    // - Parâmetros -
    complex Yest;
    float H, D, Snom;
    .....
    // - Métodos Virtuais -
    virtual void CondInic ( void ) = 0;
    virtual float SolucEquac ( void ) = 0;
    virtual void AtualizIbar ( void ) = 0;
    virtual void AtualizYdiag ( void ) = 0;
}
```

A individualização dos vários modelos utilizados para representar as máquinas síncronas (modelos I, II, III, IV e V descrito no item 4.1.1) será efetuada por classes especializadas descendentes da classe abstrata proposta. Obviamente cada classe descendente adicionará características específicas referente ao modelo que estiver representando. A figura 5.7 ilustra a estrutura de descendência entre os modelos específicos de máquinas síncronas e a classe base.

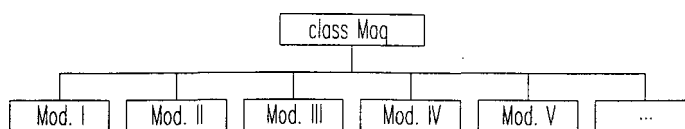


Figura 5.7 - Estrutura de descendência para os modelos de máquinas síncronas

O efeito da máquina síncrona é refletido na rede elétrica através de uma injeção de corrente na barra (I) e uma admitância em derivação (Y_{est}) que pode ser adicionada à matriz admitância nodal, semelhante ao procedimento adotado para a carga. Da mesma forma, os efeitos do comportamento da turbina e do regulador de tensão são refletidos sobre a máquina síncrona através da alteração das variáveis públicas P_m e E_{fd} , respectivamente. Assim, a máquina síncrona desconhece completamente quais modelos específicos de turbina ou regulador de tensão estão conectados, sentindo apenas os seus efeitos pela alteração das variáveis públicas de comunicação.

5.2.4.2. Regulador de Tensão

A classe definida para representar os reguladores de tensão utiliza a mesma filosofia de atuação da classe máquina síncrona. O fragmento de código abaixo descreve a classe abstrata utilizada como base para a implementação dos reguladores de tensão.

```
class RegTens {
    // - Identificação -
    int num;
    // - Conexão a Barra -
    Barra *PtrBar;
    // - Conexão a Máquina Síncrona -
    Maq *PtrMaq;
    // - Variáveis de Comunicação -
    float V, Efd;
    .....
    // - Métodos Virtuais -
    virtual void CondInic ( void ) = 0;
    virtual float SolucEquac ( void ) = 0;
    virtual void AtualizEfd ( void ) = 0;
}
```

Os reguladores de tensão, como elementos controladores, devem monitorar a tensão terminal da barra onde está conectada a máquina síncrona (ou da barra de controle). Este procedimento é levemente diferente do adotado para as máquinas síncronas, onde os elementos conectados à máquina modificam diretamente a variável de comunicação correspondente ao seu efeito na máquina síncrona.

5.2.4.3. Outros Elementos da Unidade de Geração

Procedimentos semelhantes aos utilizados para as máquinas síncronas e reguladores de tensão são adotados para todos os demais elementos da unidade de geração, tais como :

- *reguladores de velocidade;*
- *estabilizadores e*

- *caldeiras ou reatores nucleares.*

5.2.5. Equipamentos FACTS

Os equipamentos FACTS possuem certas peculiaridades que impõem a adoção de uma estrutura computacional especial para representá-los. Diferentemente dos demais elementos do SEE, estes equipamentos não possuem vias de comunicação bem determinadas, ou seja, de acordo com o tipo de equipamento representado (compensador estático de reativos, capacitor série controlado, etc) e do sinal suplementar aplicado (derivado da frequência, velocidade de máquinas síncronas, fluxo de potência em LTs, etc), diferentes variáveis de comunicação são necessárias entre os FACTS e os elementos do SEE. Por esta razão tornam-se necessários elementos de conexão genéricos para estabelecer o fluxo de informação entre os FACTS e os demais elementos do SEE.

Definidos estes elementos de conexão, uma classe FACTS pode ser implementada para agrupar, em uma estrutura única, todos os elementos que compõem um equipamento FACTS. A figura 5.8 ilustra esquematicamente a estrutura computacional definida para representar estes equipamentos.

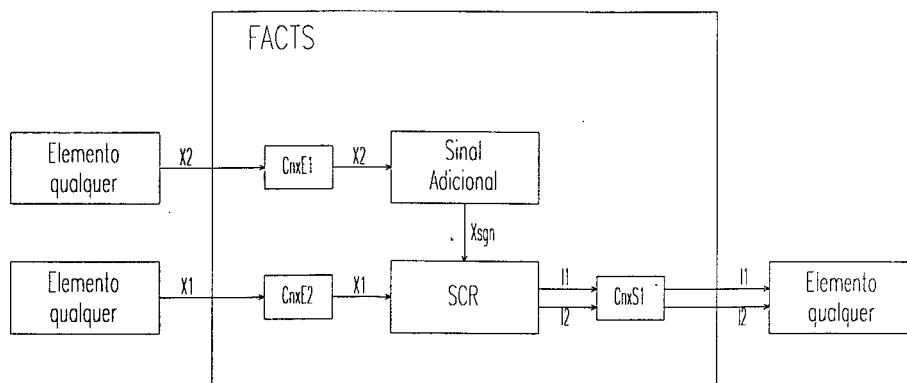


Figura 5.8 - Estrutura computacional dos equipamentos FACTS

A estrutura computacional implementada, conforme pode ser visualizado na figura 5.8, possui dois fluxos de informações distintos, o primeiro interno aos elementos que compõem a classe FACTS e o segundo externo com os elementos conectados ao objeto FACTS. O gerenciamento dos fluxos de informações e do envio das mensagens para os elementos é realizado internamente pelo objeto FACTS, semelhante ao procedimento adotado para as unidades de geração. A seguir são descritos os elementos que compõem a classe FACTS.

5.2.5.1. Sistema de Compensação Reativa - SCR

O Sistema de Compensação Reativa (SCR) é o elemento que individualiza o tipo de equipamento FACTS representado. Para isto, uma classe abstrata base, denominada SCR, foi utilizada para padronizar os protocolos de envio de mensagens e as variáveis de comunicação dos seus elementos descendentes. As classes relativas aos modelos adotados para Compensador Estático de Reativos e para Capacitor Série Controlado (*class CER* e *class CSC*, respectivamente) são especializações da classe base SCR, conforme ilustra a figura 5.9.

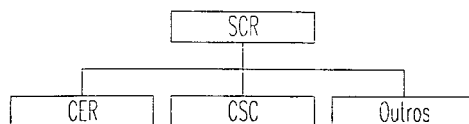


Figura 5.9 - Estrutura de descendência para os modelos de FACTS

As estruturas computacionais que representam as especializações da classe abstrata SCR possuem algumas peculiaridades que devem ser salientadas :

- **Compensador Estático de Reativos (CER)** : os CERs são elementos em derivação nas barras do sistema. Assim, o seu efeito reflete-se na rede elétrica através de uma injeção única de corrente na sua barra de conexão ($I1 \neq 0$ e $I2 = 0$ na figura 5.8). Por esta razão, o elemento responsável pelo fluxo de informações de saída do objeto FACTS (*CnxSI*) deve conectar-se a apenas uma barra, de maneira a atualizar a injeção de corrente correspondente ao efeito do CER;
- **Capacitor Série Controlado (CSC)** : os CSCs são elementos série na rede elétrica. Assim, o seu efeito reflete-se na rede elétrica através de injeções de correntes de compensação nas suas barras terminais (ver item 4.2.3). Por este motivo, o elemento responsável pelo fluxo de informações de saída do objeto FACTS (*CnxSI*) deve conectar-se às duas barras terminais do CSC, de maneira a atualizar as injeções de correntes de compensação correspondentes ao efeito do CSC ($I1 \neq 0$ e $I2 \neq 0$ na figura 5.8);
- **Outros Equipamentos FACTS** : outros modelos para equipamentos FACTS podem ser facilmente adicionados devido à padronização de interface imposta pela classe base SCR.

5.2.5.2. Sinal Adicional

Os controladores que processam o sinal adicional aplicado aos FACTS geralmente possuem estrutura idêntica aos ESPs das máquinas síncronas. Assim, as classes que representam os

ESPs das máquinas síncronas foram adaptadas para serem utilizadas nos equipamentos FACTS, através da adição de novas variáveis de comunicação e de conexão.

5.2.5.3. Elementos de Conexão

O fluxo de informações estabelecido com os elementos externos aos dispositivos FACTS é viabilizado devido a atuação dos elementos de conexão. A adoção, neste trabalho, de apenas dois modelos para representar os equipamentos FACTS simplifica substancialmente a implementação destes elementos, conforme é descrito a seguir.

- **Conexões de Entrada ($CnxE1$ e $CnxE2$)** : em função dos dois modelos de FACTS implementados, os elementos que realizam a aquisição das variáveis de comunicação necessitam monitorar variáveis de apenas três elementos : barras, ramos e máquinas síncronas. Assim, informações como tensão e frequência na barra, fluxo de potência e corrente nos ramos, bem como todas as variáveis das máquinas síncronas (w , Pe , Pa , etc) devem estar disponíveis, se necessário, para os elementos que compõem o objeto FACTS;

- **Conexões de Saída ($CnxS1$)** : o efeito dos equipamentos FACTS reflete-se na rede elétrica através de uma ou duas injeções de corrente nas barras do SEE ($I1$ e $I2$), conforme o tipo de equipamento FACTS representado (CER ou CSC). Por esta razão, o elemento que define o fluxo de informações de saída deve possuir a capacidade de conexão a uma ou duas barras do SEE, atualizando as injeções de corrente correspondentes ao efeito do modelo de FACTS representado.

5.2.6. Controle Automático da Geração

O fluxo de informações estabelecido entre o CAG e os elementos externos pertencentes à área de controle é composto pela frequência das barras, pelo fluxo nas LTs de fronteira e pelo sinal de controle para as unidades de geração sob CAG. Assim, as variáveis que definem o fluxo de informações são bem definidas (f , P_{LT} e P_O). Por outro lado, os elementos externos de conexão (barras, LTs e unidades de geração) podem variar em quantidade e localização no SEE, uma vez que para cada área de controle são definidas diferentes barras de monitoração de frequência, LTs de fronteira e unidades de geração sob CAG. Por este motivo, mecanismos especiais de conexão aos elementos externos são necessários. A figura 5.10 abaixo ilustra esquematicamente a estrutura computacional definida para representar o CAG.

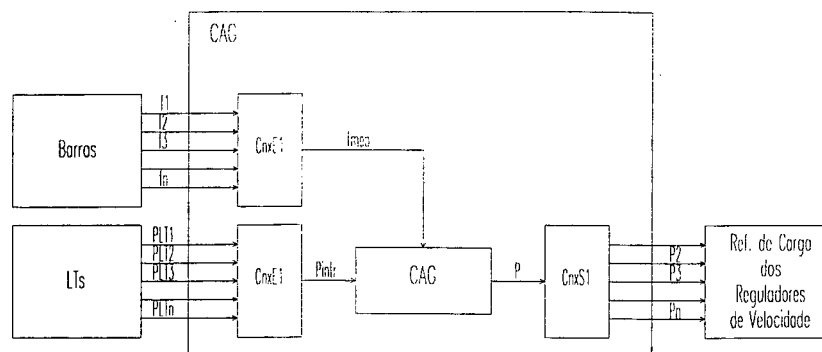


Figura 5.10 - Estrutura computacional do Controle Automático de Geração

Esta estrutura possui três elementos de conexão (*CnxE1*, *CnxE2* e *CnxSI*), responsáveis pelo fluxo de informações com os elementos externos conectados ao CAG. Os elementos de conexão possuem certas peculiaridades que devem ser salientadas.

- **Conexões de Entrada (*CnxE1* e *CnxE2*)** : o número de vias de comunicação de entrada depende do número de barras onde é realizada a monitoração da frequência e do número de LTs de fronteira da área de controle. Estes elementos são declarados na definição do CAG. Assim, duas listas encadeadas, alocadas dinamicamente, foram adotadas para realizar a conexão e a monitoração da frequência nas barras da área de controle e do fluxo nas LTs de fronteira, sendo que cada elemento da lista encadeada conecta-se a um elemento do SEE. Desta forma é possível ajustar exatamente o tamanho das listas encadeadas ao número de elementos de conexão necessários;

- **Conexões de Saída (*CnxSI*)** : as vias de comunicação de saída do CAG utilizam uma estrutura computacional semelhante à definida para as vias de comunicação de entrada. Onde os elementos de saída conectam-se às unidades de geração que foram declaradas como unidades de controle carga-geração na definição do CAG. Assim, cada elemento da lista encadeada de saída altera a referência de carga do regulador de velocidade da unidade de geração sob CAG.

O gerenciamento do fluxo de informações do CAG e a determinação do sinal de controle aplicado aos reguladores de velocidade das unidades de geração sob CAG (ver capítulo 4, ítem 4.5) são realizados internamente pelo objeto CAG.

5.3. Solução das Equações da Rede Elétrica

Em um programa de Simulação da Dinâmica de SEE baseado no esquema alternado im-

plícito, a maior parte do esforço computacional envolvido é devido a resolução das equações da rede elétrica (equação 3.6). Assim para que o programa tenha um desempenho aceitável deve empregar uma eficiente metodologia para solucionar este sistema de equações.

O sistema de equações que define o comportamento da rede elétrica é organizado na forma de uma expressão matricial, onde seu elemento principal é a matriz admitância nodal da rede elétrica (Y). A metodologia computacional para a solução de um sistema de equações, através de métodos diretos do tipo fatoração LU [24], é atualmente bem determinada, sendo implementada eficientemente nos programas que utilizam linguagens convencionais de programação (FORTRAN). Esta metodologia, entretanto, não pode ser diretamente aplicada a estruturas de dados baseadas em listas encadeadas alocadas dinamicamente, uma vez que, nestas estruturas, não existe a indexação direta dos elementos da lista, o que resulta no baixo desempenho computacional do método. Por esta razão, a utilização da POO e de estruturas baseadas em listas encadeadas dinâmicas impõem uma reavaliação nas metodologias para armazenamento, fatoração LU e substituição direta-inversa atualmente utilizadas com as linguagens tradicionais.

A seguir propõe-se uma classe matriz esparsa (*class Matriz*) desenvolvida para aplicações gerais em SEE. Neste trabalho, a classe matriz é utilizada para representar a matriz admitância nodal da rede elétrica, sendo apresentados detalhes relativos ao seu armazenamento, fatoração LU e implementação do processo de resolução das equações da rede elétrica, fundamentais no desempenho computacional de um programa de simulação.

5.3.1. Armazenamento e Montagem da Matriz

Uma estrutura computacional para representar matrizes deve eficientemente gerenciar o seu armazenamento na forma esparsa e as operações associadas à realização dos processos de fatoração LU e de substituição direta-inversa. Para atender a esses requisitos foi definida uma classe denominada matriz, cujos detalhes são descritos a seguir.

A estrutura matricial implementada utiliza armazenamento dinâmico para todos os elementos da matriz, através do uso de listas encadeadas. Isto permite que a dimensão da matriz seja definida durante a execução do programa. Assim, a classe matriz adapta-se à dimensão do problema, requisitando apenas a memória necessária ao armazenamento dos elementos não-nulos da matriz e da sua estrutura de gerenciamento. Um encadeamento múltiplo para os elementos da matriz foi utilizado visando aumentar a eficiência das operações matriciais, onde

cada elemento da matriz pertence a duas listas encadeadas, uma segundo as linhas e outra segundo as colunas da matriz. O encadeamento múltiplo é estruturado sobre duas listas de índices que indicam os elementos iniciais de cada linha e coluna da matriz, agilizando assim o processo de busca sobre os elementos da matriz. A figura 5.11 ilustra a estrutura utilizada para representar as matrizes.

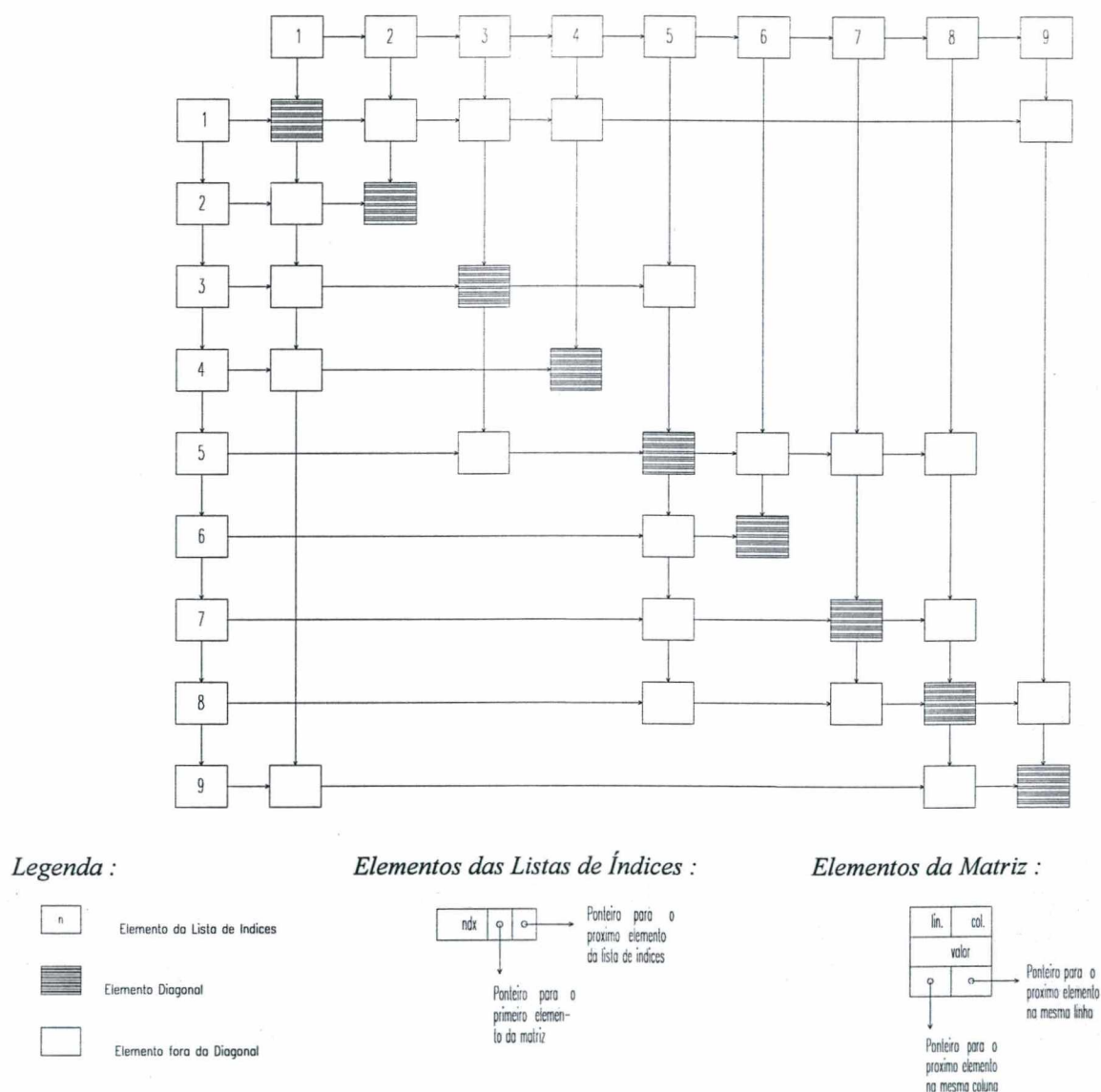


Figura 5.11 - Estrutura da Matriz Esparsa

O Objeto Matriz implementado é totalmente dinâmico e auto contido, ficando sob sua responsabilidade o gerenciamento de toda a estrutura matricial. Este gerenciamento efetua-se através do recebimento de mensagens e da redefinição dos operadores da linguagem C++ para efetuarem tarefas sobre o objeto matriz. A técnica de redefinição de operadores denomina-se Sobrecarga de Operadores e permite atribuir tarefas específicas sobre os objetos aos operadores

normais da linguagem C++ (tais como +, -, *, /, =, [], (), etc). Assim instruções do tipo :

```
Matriz A (15,15);.
A(10,10) = 5;
A(1,1) = A(10,10) * 2.5;
```

podem ser utilizadas diretamente no código do programa para manipular os objetos matrizes definidos. Esta técnica adiciona clareza e legibilidade ao código escrito.

A memória computacional requisitada para o armazenamento de uma matriz esparsa, utilizando a estrutura proposta, pode ser estimada através da equação 5.1 abaixo.

$$\text{mem} = 38 + 20*n + 0.01*n^2*p*(12 + e) \text{ [bytes]} \quad (5.1)$$

onde “n” é a dimensão da matriz, “p” o percentual de valores não nulos da matriz e “e” o número de bytes necessários para armazenar uma variável qualquer nos elementos da matriz (e=4 para elementos reais com precisão simples, e=8 para elementos complexos com precisão simples e e=16 para elementos bloco matriciais 2x2 com precisão simples).

O fragmento de código abaixo descreve a classe matriz.

```
class Matriz {
    // - Descrição da Estrutura da Matriz -
    int lin, col, nao_zero, fill_ins;
    // - Lista Encadeada de Indices -
    NdxLin *IndxLin, *PtrLin;
    NdxCol *IndxCol, *PtrCol;
    .....
    // - Lista Encadeada Auxiliar -
    NdxAux *IndxAux, *PtrAux;
    // - Construtores -
    Matriz ( int lin, int col );
    Matriz ( Barra *PtrBarra );
    // - Operadores Sobrecarregados -
    Matriz& operator ( ) ( int L, int C );
    Matriz& operator = ( complex valor );
    // - Métodos -
    Matriz& LU ( void );
    Matriz& SolucDI ( Barra *PtrBarra );
}
```

5.3.2. Fatoração LU

A fatoração LU de uma matriz esparsa deve estar entre as implementações mais eficientes e bem elaboradas para aplicações em SEE. De fato, para alguns esquemas de solução das equações do SEE (ver item 3.1.3.2. - Esquema Simultâneo), onde são requeridas várias fatorações durante o processo de simulação, uma eficiente implementação da fatoração LU é fator

determinante para o desempenho computacional do método.

A estrutura de armazenamento proposta adapta-se eficientemente ao processo de fatora-ção da matriz. Entretanto, devido a própria natureza do método de fatora-ção, são necessárias indesejáveis buscas por elementos na estrutura matricial, o que reduz o desempenho computaci-onal do método. Esta é a principal deficiência em estruturas computacionais baseadas na utiliza-ção de listas encadeadas dinâmicas [23,83].

Por esta razão introduziu-se na estrutura matricial uma Lista Auxiliar, alocada somente durante o processo de fatora-ção. Esta lista contribui para aumentar a eficiência computacional do método, eliminando quase completamente as buscas por elementos na matriz. Para ilustrar a metodologia adotada utiliza-se o exemplo da figura 5.12.

O processo de fatora-ção é feito seqüencialmente a partir da determinação do pivô (elemento 1-1 da figura 5.12a), executando-se combinações lineares adequadas entre as linhas da matriz até que todos os elementos da coluna abaixo do pivô sejam eliminados. Armazena-se os fatores de multiplicação nas posições correspondentes aos elementos eliminados. Os ele-mentos pertencentes à lista definida pela coluna abaixo do pivô determinam a seqüência das linhas da matriz que sofrerão combinações lineares (ver figura 5.11).

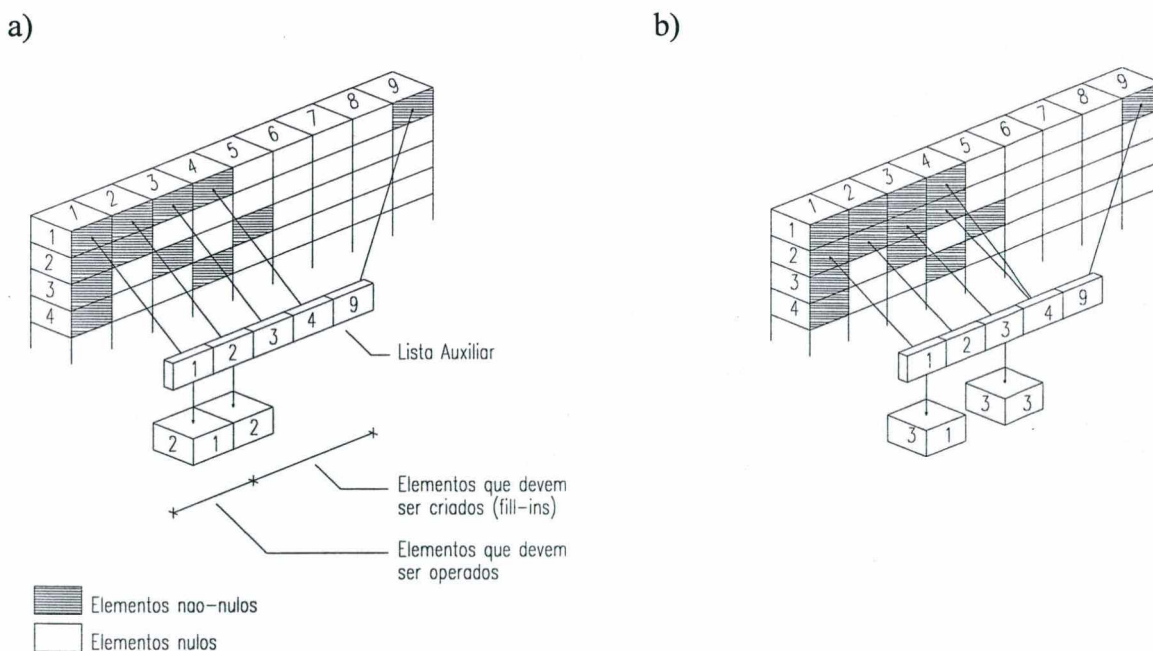
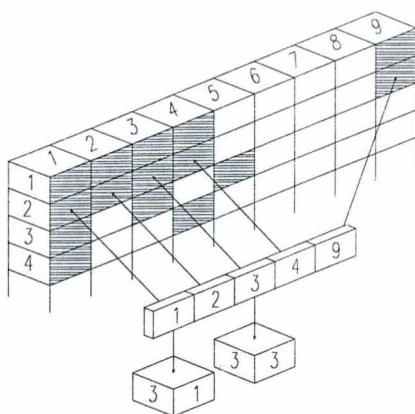
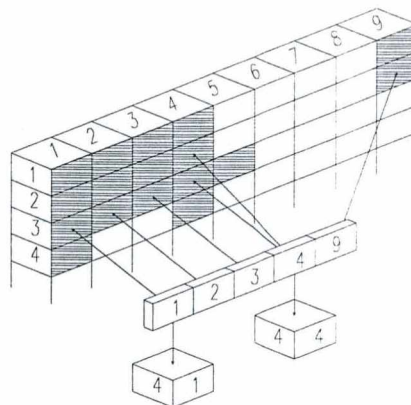


Figura 5.12 - Seqüência de Operações durante a Fatora-ção *LU* da Matriz

c)



d)


 Figura 5.12 - Sequência de Operações durante a Fatoração LU da Matriz

A lista auxiliar é inicialmente dimensionada para indicar os elementos da matriz correspondentes a linha do pivô selecionado, como mostra a figura 5.12a. Os elementos indicados pela lista auxiliar que possuem elementos correspondentes a suas posições na linha que sofrerá combinação linear definem as operações matemáticas do processo de fatoração LU . Os elementos que não possuem correspondentes definem os elementos de preenchimento (“*fill-ins*”), conforme mostra a figura 5.12a.

As figuras 5.12b e 5.12d ilustram, respectivamente, os processos combinação linear entre a linha 1 e as linhas 2 e 3 da matriz, mostrando o reajuste necessário na lista auxiliar durante estes processos. O uso da lista auxiliar evita a busca por elementos na estrutura matricial quando surge um elemento de preenchimento, uma vez que, o surgimento de “*fill-ins*” força um ajuste nos indicadores de próximo elemento para os elementos da linha e coluna anteriores ao “*fill-in*”. Sempre que surge um “*fill-in*” (elemento 2-4 na figura 5.12b) os elementos da lista auxiliar estão indicando exatamente os elementos da matriz que deverão ter seus indicadores de próximo elemento reajustados (elementos 1-4 e 2-3 da figura 5.12b), evitando assim buscas sobre a estrutura da matriz.

Ao final do processo de combinação linear entre duas linhas da matriz a lista auxiliar estará completamente reajustada, indicando os elementos anteriores, segundo as colunas da matriz, aos elementos da próxima linha que sofrerá combinação linear com a linha do pivô. A figura 5.12c ilustra o novo ajuste da lista auxiliar ao final do processo de combinação linear entre as linhas 1 e 2 da matriz. O processo continua, figura 5.12d, até a eliminação completa dos elementos da coluna onde está o primeiro pivô, quando então é determinado um novo pivô e redimensionada a lista auxiliar a partir da linha deste novo pivô, conforme ilustra a figura 5.13. O

processo então repete-se até que todos os elementos abaixo da diagonal principal da matriz tenham sido eliminados.

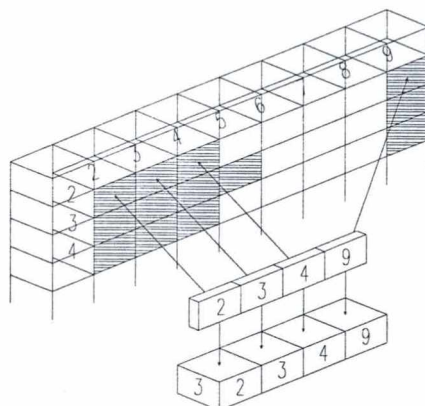


Figura 5.13 - Estrutura resultante após a eliminação de uma coluna da Matriz

O processo de fatoração assim definido é muito eficiente e pode ser aplicado diretamente sem perda de eficiência a matrizes simétricas e não simétricas em valores ou em estrutura. Além disto, o elemento armazenado na estrutura matricial pode ser substituído por qualquer estrutura válida, sem nenhuma alteração no código escrito para a fatoração. Exemplo disto seria a substituição do termo complexo armazenado na Y por um termo bloco matricial 2×2 , deixando então, a estrutura adaptada para representar a matriz Jacobiana do fluxo de potência.

5.3.3. Substituição Direta-Inversa

Em um programa de simulação baseado no esquema alternado, o desempenho do processo de resolução das equações da rede elétrica é fundamental para a eficiência computacional. Assim, para acelerar o processo de resolução das equações da rede elétrica foram adicionados apontadores, na definição da classe Barra, que permitem uma conexão direta com os elementos diagonais da matriz, conforme ilustra a figura 5.14. A conexão direta dos objetos barra aos elementos diagonais da matriz, aliada à lista duplamente encadeada das barras [83] permite um fácil deslocamento pelos elementos diagonais da matriz, em ambos os sentidos. Desta forma, buscas pelos elementos diagonais durante o processo de solução das equações da rede são completamente eliminadas.

Na resolução das equações da rede elétrica utiliza-se a lista de barras do SEE (ver ilustração 5.14) como vetor independente e vetor solução da equação matricial (variáveis I e V , respectivamente).

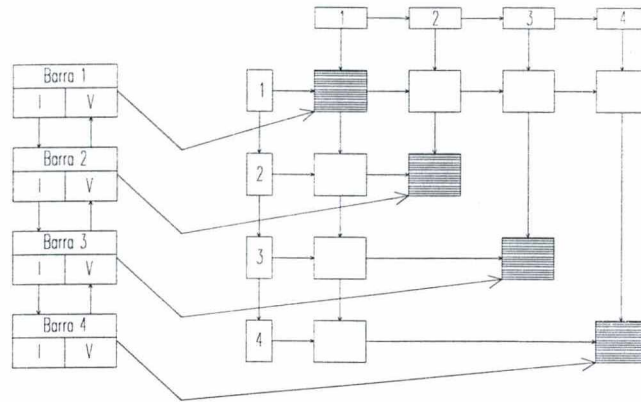


Figura 5.14 - Estrutura de Conexão das Barras à matriz admitância nodal

A exploração do encadeamento múltiplo entre os elementos da matriz, juntamente com a estrutura de interconectividade fornecida pelas conexões entre barras e ramos, permite a implementação de uma rotina de substituição direta-inversa muito eficiente. Assim, são eliminadas completamente buscas sobre a estrutura matricial durante este processo.

5.4. Outras Estruturas Orientadas a Objetos Utilizadas

A implementação de um programa para simulação da dinâmica de SEE deve dispor ainda de estruturas computacionais que executem tarefas acessórias, tais como a aplicação de diversos tipos de eventos sobre os principais elementos do SEE ou o armazenamento, ao longo do tempo de simulação, de todas as variáveis consideradas relevantes à análise da simulação efetuada, para posterior apresentação na forma de tabelas e/ou gráficos. Em vista disto, foram implementadas estruturas computacionais orientadas a objetos para os fins específicos descritos acima, sendo apresentados a seguir algumas características gerais das estruturas desenvolvidas.

5.4.1. Eventos

Para a aplicação dos eventos sobre os elementos do SEE definiu-se uma classe abstrata base (*class Evento*) para padronização dos protocolos de comunicação. A partir desta classe base, classes descendentes especializadas foram implementadas que permitem aplicar eventos específicos sobre os elementos do SEE. Assim, cada classe descendente permite aplicar um ou mais eventos diferentes a um tipo específico de elemento em um determinado instante, possuindo para isso mecanismos especiais de conexão a este elemento. As classes definidas para representar os eventos informam ao controle do fluxo geral do programa, conforme o tipo de evento,

se existe a necessidade de atualização e refatoração da matriz Y . Caso não exista esta necessidade, este procedimento não é realizado.

A seguir são listados os principais tipos de eventos implementados :

- aplicação e remoção de curto-circuito em qualquer barra do SEE;
- abertura e fechamento de qualquer ramo do SEE;
- bloqueio e liberação do mecanismo de controle automático dos taps dos LTCs;
- incremento e decremento nos taps dos transformadores;
- alteração dos valores nominais das cargas e dos capacitores/reatores;
- desligamento de unidades de geração;
- degrau em todas as referências dos controladores, bem como em todas as variáveis que definem o fluxo de informações das unidades de geração.

5.4.2. Armazenamento e Apresentação dos Resultados

Para o armazenamento dos resultados, fornecidos pelo programa, utiliza-se uma estrutura computacional semelhante à utilizada para os eventos. Entretanto, ao contrário dos eventos, a estrutura de dados definida aumenta à medida que a simulação evolui. Por esta razão, foi implementada uma lista encadeada, alocada dinamicamente, para cada variável monitorada. Esta lista armazena os resultados da simulação referentes à variável monitorada. Assim, após definidas estas variáveis, a lista encadeada correspondente adiciona termos a sua estrutura a medida que a simulação evolui, sendo que cada termo armazena o valor da variável monitorada para cada instante de tempo, ou para intervalos regulares de tempo.

5.5. Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a estrutura computacional implementada para representar os equipamentos do SEE. Em vista das dificuldades que as linguagens convencionais apresentam quanto a manutenção e atualização dos programas, foi proposta a utilização da linguagem C++ e da POO para a implementação da estrutura computacional do programa desenvolvido.

Na parte inicial do capítulo, foram introduzidos e definidos os conceitos gerais da POO. Tais conceitos são de fundamental importância para o correto entendimento da estrutura computacional definida. Em uma segunda parte, foi proposta a modelagem orientada a objetos para

representar os equipamentos do SEE. A estrutura computacional proposta utiliza particularidades do problema para melhorar o desempenho computacional do programa, sem reduzir a flexibilidade da estrutura desenvolvida para utilização em outras aplicações de SEE. Finalmente, foi proposta uma estrutura matricial orientada a objetos para representar matrizes esparsas em aplicações de SEE. Detalhes específicos relativos a implementação desta estrutura matricial foram apresentados, uma vez que são fundamentais para o desempenho computacional dos programas.

A programação orientada a objetos juntamente com a linguagem C++ mostrou-se uma ferramenta poderosa para as mais diversas aplicações em SEE, uma vez que após implementada uma estrutura computacional eficiente para representar os equipamentos do SEE, esta mesma estrutura pode ser utilizada para outras aplicações simplesmente redefinindo e/ou adicionando características pertinentes a esta nova aplicação, através do mecanismo da herança. Assim evita-se que objetos perfeitamente definidos e validados sejam alterados por outros programadores.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS DE SIMULAÇÕES E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO COMPUTACIONAL

A estrutura computacional orientada a objetos proposta no capítulo anterior foi utilizada para a implementação de um programa de simulação da dinâmica de SEE. Este programa foi denominado SIMSP - *Simulador de Sistemas de Energia Elétrica* e consiste de um módulo computacional orientado a objetos para a simulação da dinâmica de curto e longo prazo de SEE. No programa implementado (SIMSP) estão disponíveis para simulação todos os modelos descritos no capítulo 4 e apêndice A.

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação deste programa à simulação de vários SEE. Tais resultados foram utilizados para a validação e avaliação de desempenho do SIMSP. Os resultados apresentados têm como objetivos principais :

- demonstrar a capacidade do programa em realizar simulações tanto de curto quanto de longo prazo;
- realizar uma análise comparativa de desempenho entre o SIMSP, escrito em C++, e o ANATEM/CEPEL, programa comercial escrito em FORTRAN e usado no setor elétrico;
- avaliar o desempenho computacional do SIMSP para simulações de curta e longa duração em diversos SEE e plataformas computacionais.

O capítulo está dividido em duas partes principais, a primeira, relativa a apresentação dos resultados de simulações de curto e longo prazo, e a segunda, relativa a avaliação da performance computacional do SIMSP. Na primeira parte, são apresentadas simulações típicas de curto e longo prazo, onde são simulados eventos no SEE tais como curto-circuito na rede elétrica, representação da carga segundo uma curva de carga, ilhamentos, e uma situação de instabilidade de tensão no SEE. A apresentação destes resultados procura ilustrar a capacidade, potencialidades e robustez do programa para aplicações típicas de curto e longo prazo.

Na segunda parte deste capítulo é realizada, sob diversas formas, uma avaliação do desempenho computacional do programa implementado. Assim, são apresentados estudos comparativos de performance computacional entre o programa orientado a objetos e o programa ANATEM, para diversos SEE. Esta análise é expandida para várias plataformas computacionais.

Uma avaliação da performance do programa, em simulações de curto e longo prazo é também apresentada para vários SEE e para diversas plataformas computacionais. Finalmente, apresentam-se resultados relativos ao crescimento do tempo de CPU com a sofisticação da representação das unidades de geração e cargas utilizada em simulações de longo prazo, e com o crescimento da dimensão dos SEE.

Todos os resultados de simulações apresentados neste capítulo utilizaram o esquema *Tinney II* [24] para a ordenação das barras do SEE.

6.1. Resultados de Simulações de Curto e Longo Prazo

Um módulo de simulação da dinâmica de SEE para simuladores de ensino e treinamento deve possibilitar a realização de simulações tanto de curto quanto de longo prazo. Isto se faz necessário, afim de que este módulo possa simular todos os eventos e situações que o operador irá vivenciar na operação de um SEE real.

Para ilustração da capacidade e potencialidade do programa implementado em realizar eficientemente simulações de curto e longo prazo, cobrindo uma grande faixa de eventos e situações de operação do SEE, são apresentados resultados de simulações típicas de curta e longa duração. O comportamento dinâmico frente aos eventos e distúrbios simulados é descrito através de gráficos correspondentes a evolução no tempo das variáveis do SEE utilizadas para a análise e interpretação dos resultados.

Todos os eventos e situações foram definidos sobre um sistema de pequeno porte para

melhor visualização dos efeitos representados e interpretação dos resultados.

6.1.1. Descrição do SEE utilizado

O SEE utilizado é um equivalente do sistema elétrico interligado da região Sul do Brasil, onde foram representadas algumas áreas por equivalentes estáticos de rede. Este SEE é composto por 45 barras no total, sendo 25 de carga e 11 de geração, sendo que apenas 10 destas possuem as máquinas síncronas e demais elementos da unidade de geração representadas por modelos dinâmicos. O sistema possui ainda dois compensadores síncronos, mas estes elementos não são representados dinamicamente nas simulações realizadas.

Para fins de demonstração de situações de ilhamento e de atuação do CAG, o SEE teste foi dividido em duas áreas (Áreas 1 e 2). Cada uma delas determina uma Área de Controle para as simulações do SEE sob CAG e/ou uma ilha elétrica para as simulações de ilhamento.

O diagrama unifilar da figura 6.1 ilustra o SEE teste utilizado, bem como as áreas definidas para este SEE. As barras do SEE representadas por retângulos “sólidos” indicam nível de tensão de 525 KV enquanto as demais indicam nível de tensão de 230 KV. As barras das unidades de geração possuem níveis de tensão correspondentes à tensão terminal do gerador.

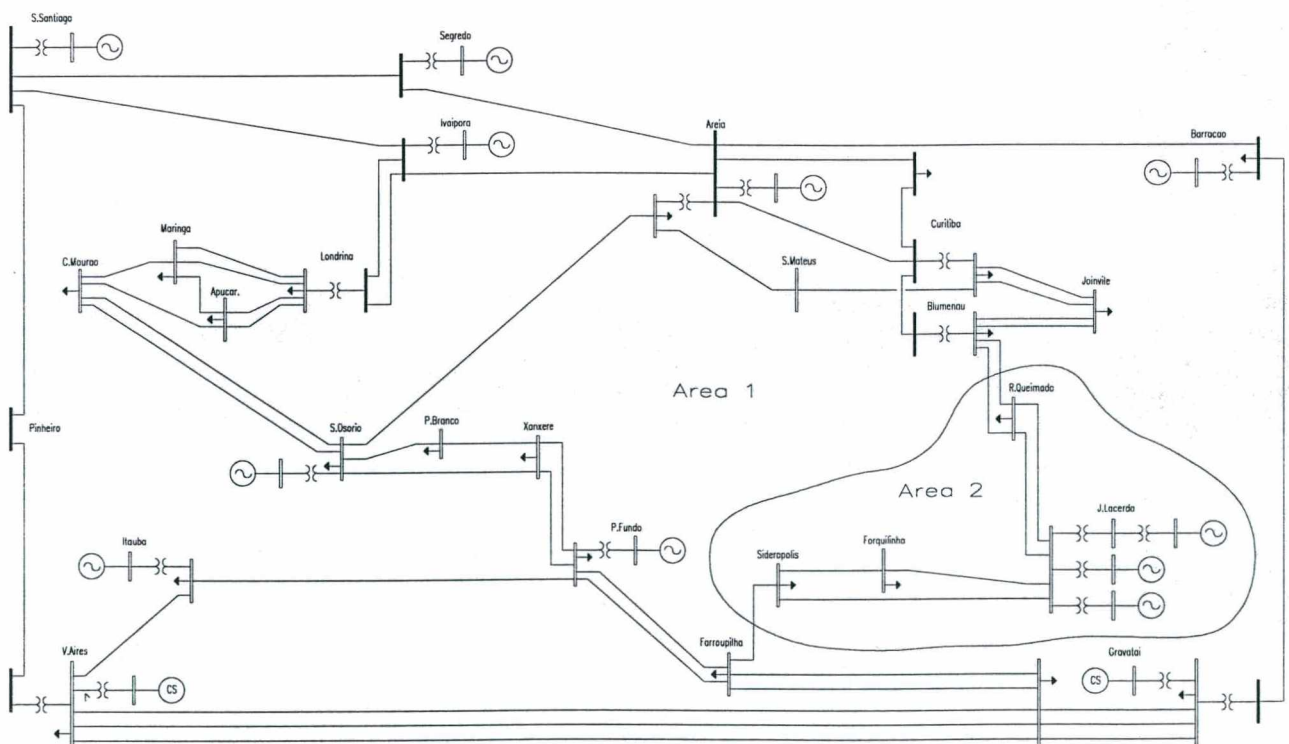


Figura 6.1 - Diagrama Unifilar do SEE teste utilizado

A seguir descrevem-se as simulações de curto e longo prazo realizadas no SEE teste.

6.1.2. Simulações de Curto Prazo

Simulações de curto prazo são as mais comumente utilizadas para a análise do desempenho dinâmico dos SEE. Tais simulações geralmente consistem na aplicação de um distúrbio no SEE e na análise da permanência em sincronismo, ou não, das máquinas síncronas deste SEE instantes após a aplicação do distúrbio, normalmente 5.0 segs. Isto torna os ângulos das máquinas síncronas as variáveis de maior interesse para a análise do comportamento dinâmico do SEE nestas simulações.

O distúrbio selecionado para ilustrar as simulações de curto prazo consiste na aplicação de um curto circuito sólido em uma das barras do SEE com posterior eliminação deste defeito pela abertura de uma LT simultaneamente em suas duas barras terminais. A modelagem utilizada para estas simulações é a convencionalmente utilizada em estudos de estabilidade transitória, sendo descrita abaixo.

Modelagem utilizada nas Simulações de Curto Prazo

- Unidades de Geração
 - * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
 - * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2);
- Cargas : modelo polinomial com 100% impedância constante (ver item A.3.1).

A seguir são descritos detalhes específicos da simulação realizada e apresentados os resultados.

6.1.2.1. TESTE A : Simulação de Curto Circuito

Um distúrbio do tipo curto circuito foi aplicado na barra de 230 KV da Usina de Itaúba. Este defeito foi eliminado 3 ciclos após sua aplicação pela abertura da LT entre as Usinas de Itaúba e P. Fundo (230 KV). Os parâmetros da simulação realizada são descritos abaixo :

- Tempo de Simulação : 5.0 segs.
- Passo de Integração : 0.01 segs.
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001

A evolução no tempo das variáveis geralmente utilizadas para analisar o efeito deste tipo de distúrbio no SEE são apresentadas a seguir.

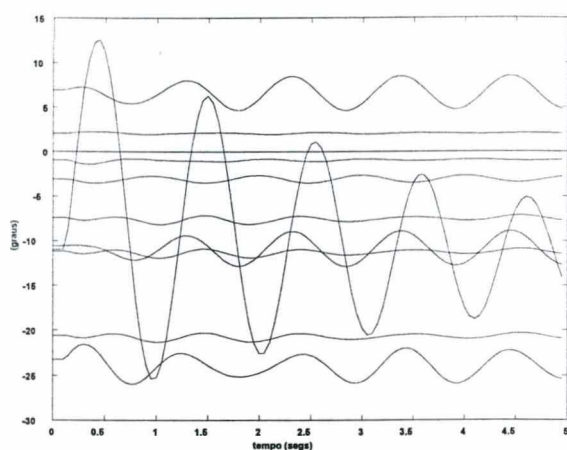


Figura 6.2 - Ângulos das Máquinas Síncronas

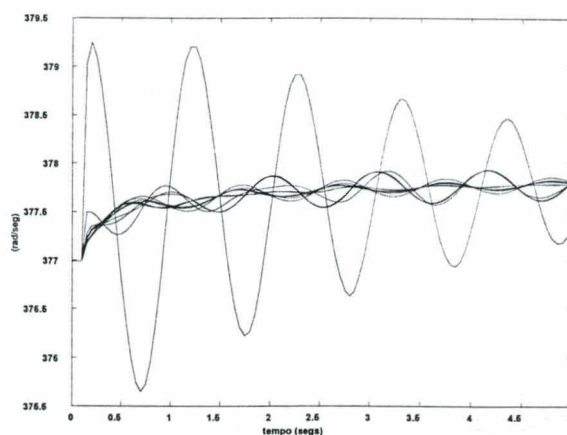


Figura 6.3 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas

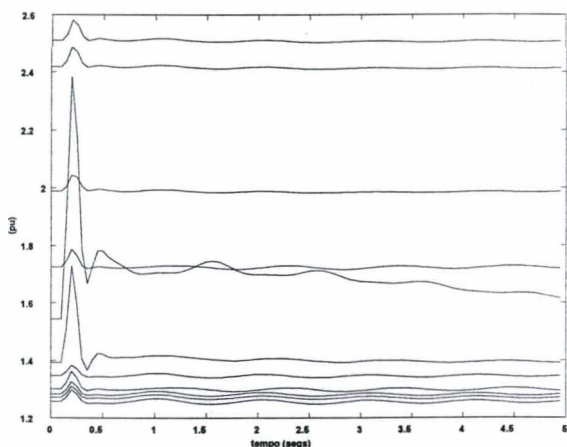


Figura 6.4 - Tensão de Campo das Máquinas Síncronas

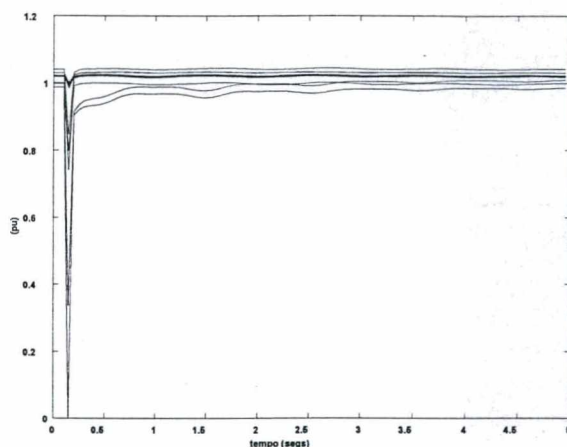


Figura 6.5 - Tensão nas Barras Terminais das Máquinas Síncronas

6.1.3. Simulações de Longo Prazo

Em simulações de longo prazo torna-se necessária a representação do comportamento dinâmico de elementos do SEE, que não são usualmente representados nas simulações de curto prazo. Isto implica na utilização de uma representação mais sofisticada para as unidades de geração e cargas do SEE. Assim, descreve-se a seguir a modelagem utilizada para as simulações de longo prazo apresentadas neste capítulo.

Modelagem utilizada nas Simulações de Longo Prazo

- Unidades de Geração

- * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
- * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2);
- * Turbina : modelo para turbina térmica ou hidráulica (ver item A.1.5);
- * Regulador de velocidade : adequado ao tipo de turbina (ver item A.1.4);
- * Caldeira : modelo de caldeira do tipo Tambor (ver item A.1.6);
- Cargas : modelo polinomial composto por parcelas de potência e impedância constante;
- CAG : representado em todas as unidades de geração da respectiva Área de Controle. O CAG pode estar atuando ou fora de operação, conforme os objetivos do teste efetuado.

Para a demonstração da capacidade do programa em realizar simulações de longo prazo são apresentados quatro casos típicos deste tipo de simulação, onde a atuação dos novos elementos representados dinamicamente tem efeito destacado no comportamento dinâmico do SEE. Os casos selecionados demonstram o comportamento do SEE para : representação da carga segundo uma curva de carga, ilhamentos no SEE, atuação dos esquemas de CAG, e, uma aplicação, bastante recente de simuladores de longo prazo, para a análise de colapso de tensão.

A seguir são descritos detalhes das simulações realizadas e apresentados os resultados.

6.1.3.1. TESTE B : Simulação para uma Curva de Carga no SEE

Para algumas simulações de longo prazo é necessária a representação da variação da carga com o tempo, através da utilização de curvas de carga discretizadas no intervalo de simulação. Este caso representa o comportamento dinâmico do SEE frente a representação da carga segundo uma curva no intervalo de tempo simulado. Para evitar excursões elevadas na frequência do SEE foi implementado um CAG, atuando sobre as três unidades de geração da Área 2.

Os parâmetros da simulação realizada são descritos abaixo :

- Tempo de Simulação : 10.0 min. (600 segs.);
- Passo de Integração : 0.01 segs.;
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001;
- Curva de carga aplicada nas barras de carga da Área 2;
- CAG implementado sobre as três unidades de geração da Usina de J. Lacerda.

O comportamento das variáveis de interesse para a simulação são apresentadas a seguir.

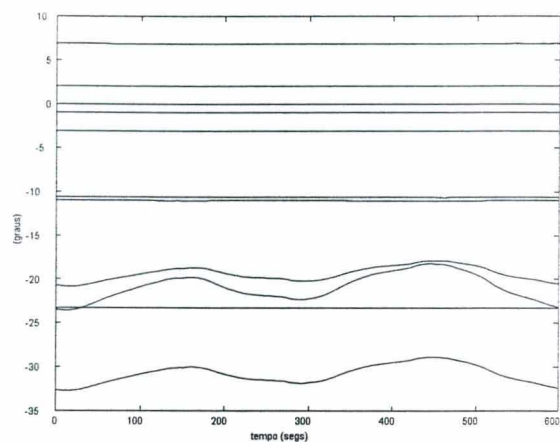


Figura 6.6 - Ângulos das Máquinas Síncronas

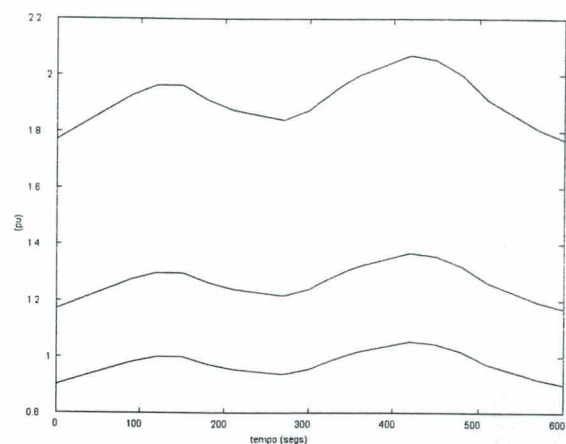


Figura 6.7 - Carga Ativa das Barras da Área 2

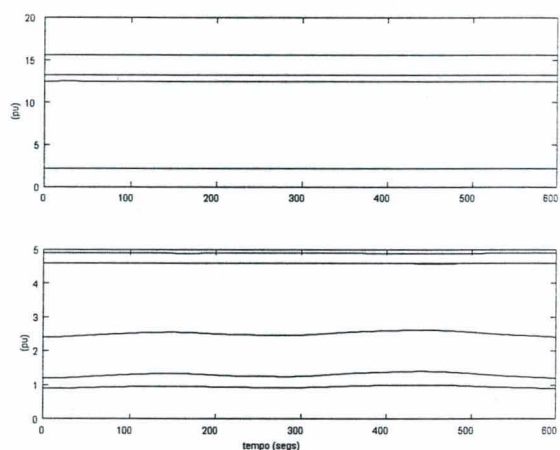


Figura 6.8 - Potência Mecânica das Máquinas Síncronas

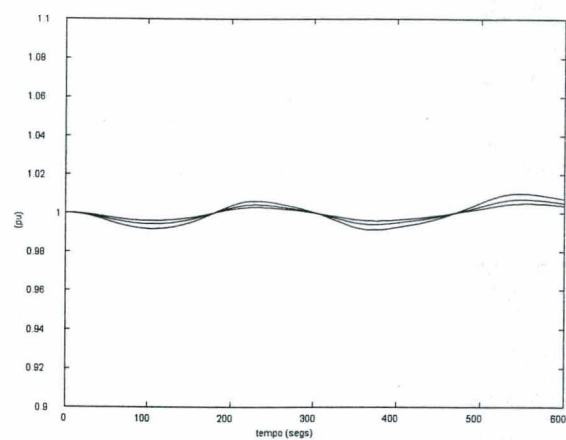


Figura 6.9 - Pressão do Vapor das Caldeiras

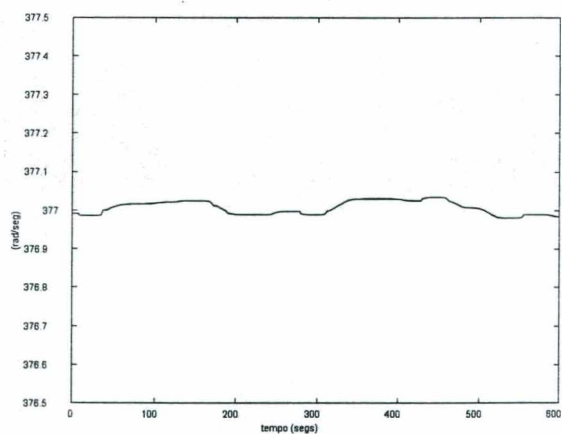


Figura 6.10 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas

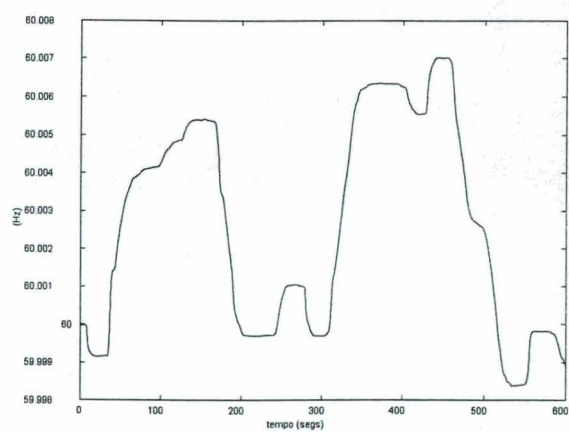


Figura 6.11 - Frequência Média do SEE

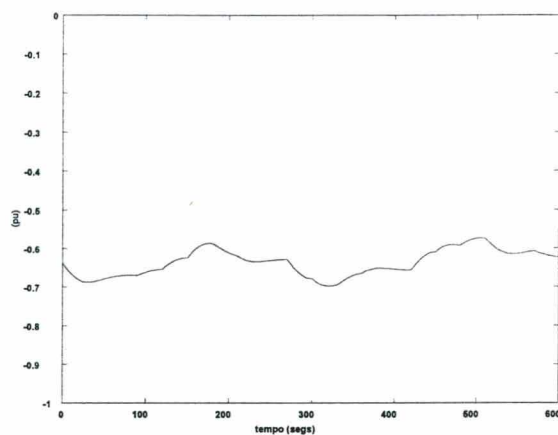


Figura 6.12 - Intercâmbio entre as Áreas 1 e 2

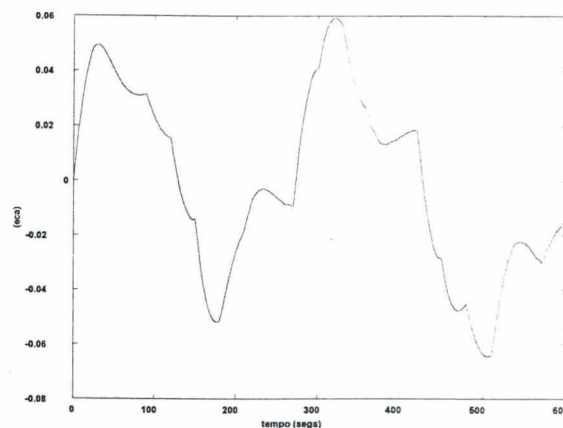


Figura 6.13 - Erro de Controle de Área

Da análise dos resultados obtidos observa-se a atuação, apenas, das três unidades de geração que compõem o CAG para o balanço carga-geração (figuras 6.6, 6.7 e 6.8). As demais unidades de geração não participam ativamente deste balanço. Devido à atuação do CAG, a frequência do SEE (figura 6.11) permanece dentro dos seus limites práticos de operação (± 0.05 Hz) e o intercâmbio entre as Áreas 1 e 2 em torno do seu valor nominal (figura 6.12).

Observa-se também, dos resultados obtidos, diferentes curvas de potência fornecidas pelas caldeiras às unidades de geração sob CAG. Isto ocorre em função de diferentes fatores de participação definidos para estas unidades de geração, uma vez que os parâmetros e modelos para as turbinas, reguladores de velocidade e caldeiras são idênticos para as três unidades.

6.1.3.2. TESTE C : Simulação de Ilhamento de uma Área do SEE sem a Atuação do CAG

Durante situações de ilhamento de áreas de um SEE podem ocorrer grandes desvios de frequência nas áreas ilhadas, em função de desbalanços entre a carga e a geração remanescentes na ilha elétrica. Estes desvios são eliminados pela atuação dos reguladores de velocidade das unidades de geração, esquemas de CAG adaptados para operar em sistemas ilhados e pela atuação dos Esquemas Regionais de Alívio de Carga - ERACs.

Este caso apresenta a simulação de um ilhamento no SEE teste. As Áreas 1 e 2 do SEE são desconectadas entre si pela abertura das LTs de fronteira relacionadas abaixo :

- * LT 1 : Farroupilha 230 KV - Siderópolis 230 KV (em $t = 1.0$ seg.);
- * LT 2 : Blumenau 230 KV - R. Queimado 230 KV [circ. 1] (em $t = 10.0$ seg.);
- * LT 3 : Blumenau 230 KV - R. Queimado 230 KV [circ. 2] (em $t = 10.0$ seg.).

Assim, deseja-se observar o comportamento dinâmico do SEE para esta situação. O CAG de ambas as áreas foi mantido fora de operação para esta simulação, ficando o controle de

freqüência da área e de velocidade das máquinas síncronas sendo efetuado apenas pelo estatismo proveniente dos reguladores de velocidade das unidades de geração. Isto mantém um erro em regime permanente na freqüência das áreas e na velocidade das máquinas síncronas. O ERAC, assim como todo o sistema de proteção, não foi representado neste trabalho.

Os parâmetros da simulação realizada são descritos abaixo :

- Tempo de Simulação : 10.0 min. (600 segs.);
- Passo de Integração : 0.01 segs.;
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001;
- CAG fora de operação para ambas as áreas do SEE.

A evolução no tempo das variáveis de interesse para este estudo são mostradas a seguir :

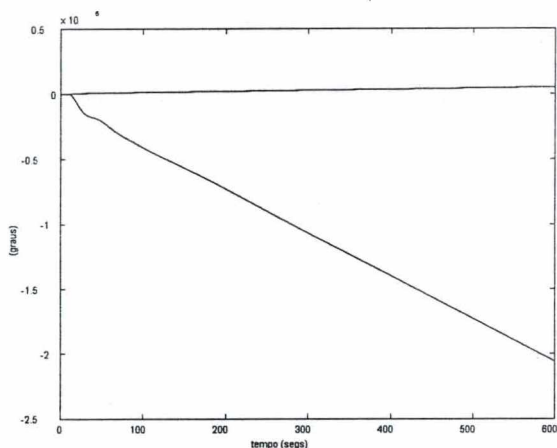


Figura 6.14 - Ângulos das Máquinas Síncronas

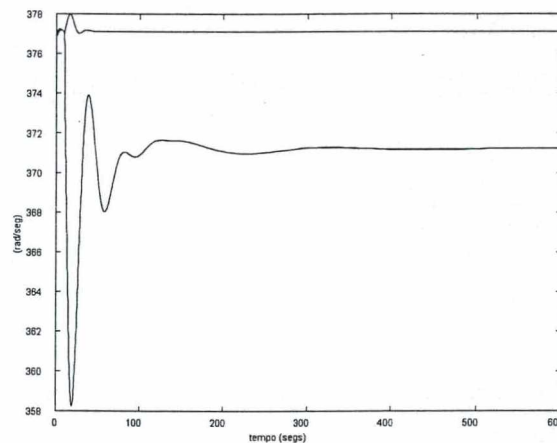


Figura 6.15 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas

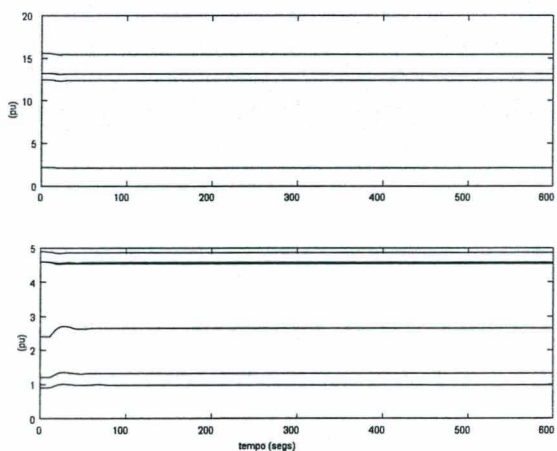


Figura 6.16 - Potência Mecânica das Máquinas Síncronas

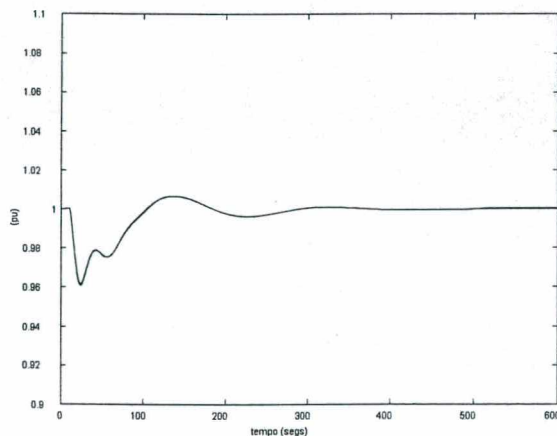


Figura 6.17 - Pressão do Vapor das Caldeiras

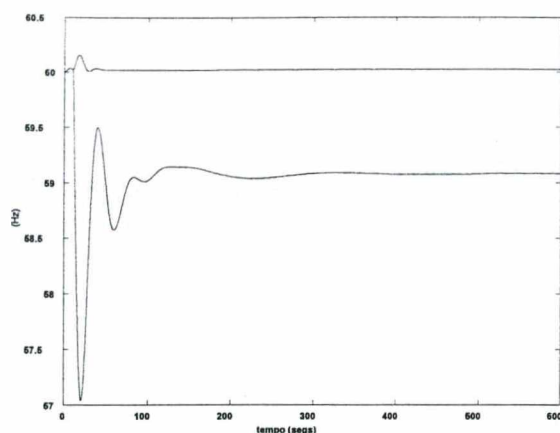


Figura 6.18 - Frequência Média das Ilhas Elétricas

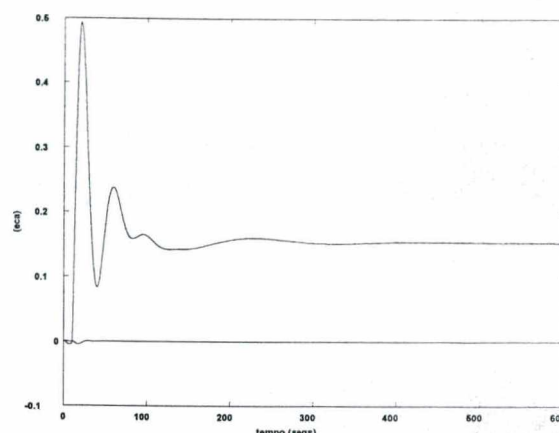


Figura 6.19 - Erro de Controle de Área

Observa-se através dos resultados obtidos o comportamento esperado para o SEE. A velocidade das máquinas síncronas e a frequência dos SEE ilhados apresentaram um erro em relação aos seus valores nominais após o amortecimento das oscilações (figuras 6.15 e 6.18 respectivamente). Devido ao desvio de velocidade das máquinas síncronas a separação angular entre as ilhas elétricas permanece crescendo indefinidamente (figura 6.14). Os ângulos das máquinas síncronas apresentados nas simulações de ilhamento (figura 6.14) são ângulos absolutos, não tendo sido apresentados na forma de desvios angulares em relação a uma máquina adotada como referência.

6.1.3.3. TESTE D : Simulação de Ilhamento de uma Área do SEE com a Atuação do CAG

A descrição deste caso é semelhante ao caso anterior, porém para esta simulação foi definido um esquema de CAG para cada área do SEE. O esquema adotado ignora o sinal de intercâmbio entre as áreas de controle para a composição do Erro de Controle de Área sempre que há o desligamento das LTs de fronteira entre as áreas do SEE, ficando o CAG operando apenas em regime de controle de frequência.

Os parâmetros da simulação realizada são descritos abaixo :

- Tempo de Simulação : 10.0 min. (600 segs.);
- Passo de Integração : 0.01 segs.;
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001;
- CAG operando para ambas as áreas do SEE.

A evolução no tempo das variáveis de interesse para este estudo são mostradas a seguir:

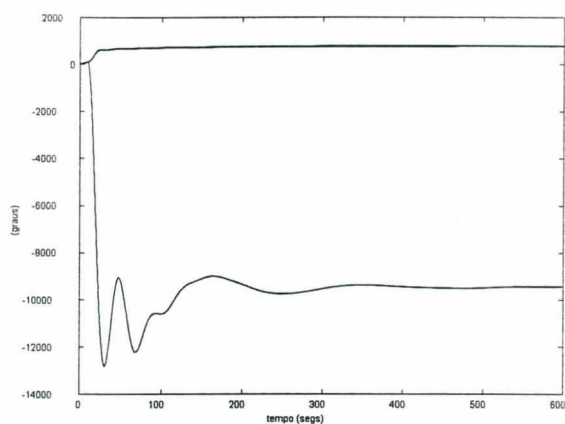


Figura 6.20 - Ângulo das Máquinas Síncronas

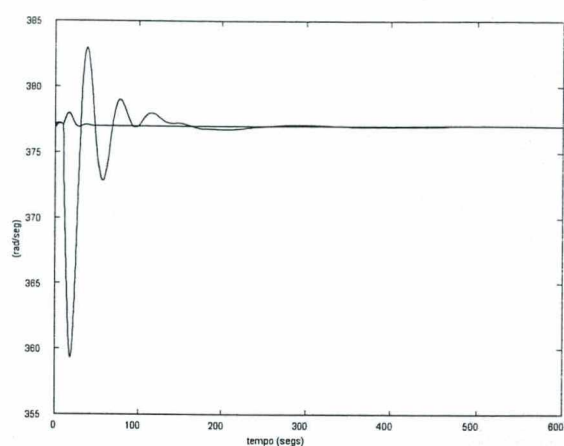


Figura 6.21 - Velocidade Angular das Máquinas Síncronas

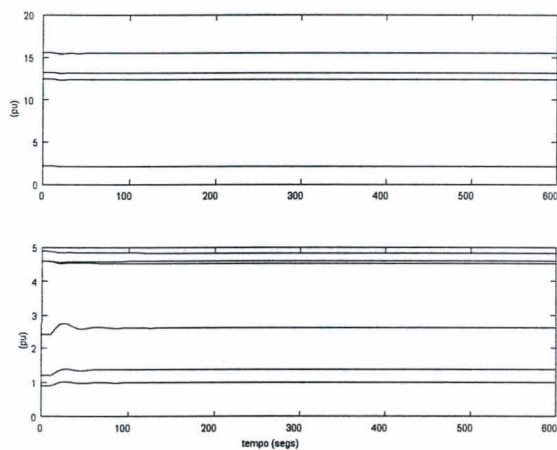


Figura 6.22 - Potência Mecânica das Máquinas Síncronas

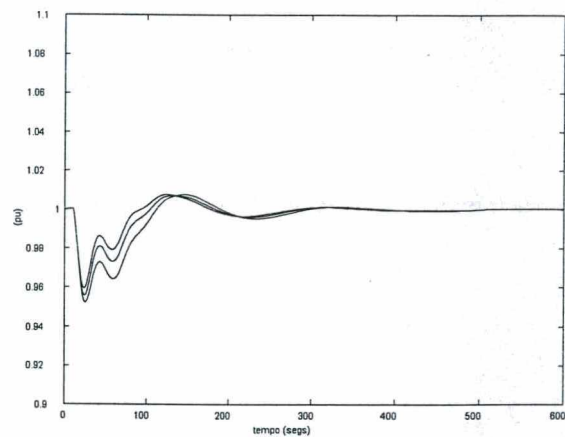


Figura 6.23 - Pressão do Vapor das Caldeiras

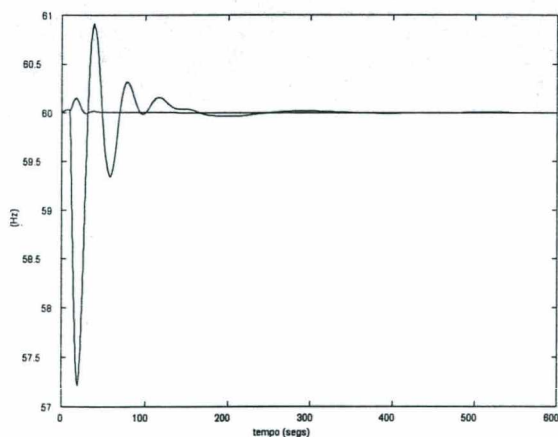


Figura 6.24 - Frequência Média das Ilhas Elétricas

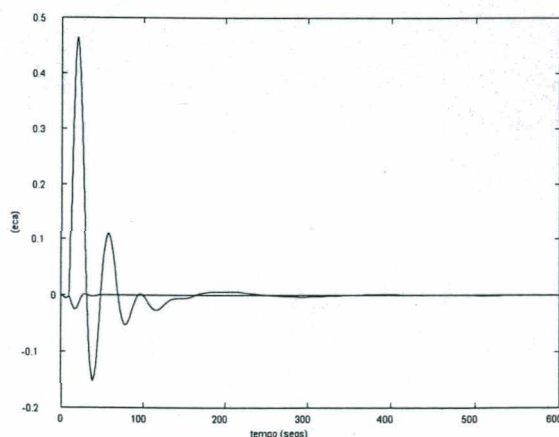


Figura 6.25 - Erro de Controle de Área

A atuação do CAG sobre as ilhas elétricas do SEE restabelece a frequência de ambas as áreas e a velocidade das máquinas síncronas para os seus valores nominais (figuras 6.24 e 6.21 respectivamente). Com o restabelecimento da velocidade das máquinas síncronas cessa o afastamento angular entre as ilhas elétricas do SEE (figura 6.20).

A grande excursão de frequência observada, na figura 6.24, durante o período transitório é inadmissível para a operação de um SEE real. Entretanto a representação dos ERACs pode evitar que a frequência alcance tais valores.

6.1.3.4. TESTE E : Simulação de Instabilidade de Tensão no SEE

Uma aplicação bastante recente para simuladores de longo prazo é a simulação visando a análise da estabilidade de tensão no SEE. Este caso ilustra então uma simulação de instabilidade de tensão.

Com o auxílio de uma ferramenta de identificação de instabilidade de tensão no SEE através da análise modal [78], conduziu-se o SEE teste a uma situação de pré-colapso de tensão, através do crescimento da carga em uma das barras do SEE. Nesta situação foi aplicado um pequeno degrau de carga (0.1%) na barra onde foi realizado o acréscimo de carga.

Os parâmetros da simulação realizada são descritos abaixo :

- Tempo de Simulação : 19.0 segs.;
- Passo de Integração : 0.01 segs.
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001

Em virtude da indisponibilidade, na ferramenta de análise modal, da modelagem completa para estudos de longa duração utilizou-se a seguinte modelagem para a simulação efetuada.

- Unidades de Geração
 - * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
 - * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2.);
- Cargas : modelo polinomial com 100% potência constante.

A evolução no tempo das variáveis de interesse para esta simulação são apresentadas a seguir :

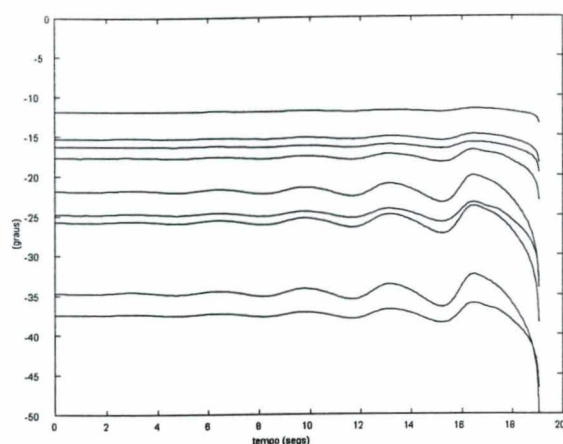


Figura 6.26 - Ângulo das Máquinas Síncronas

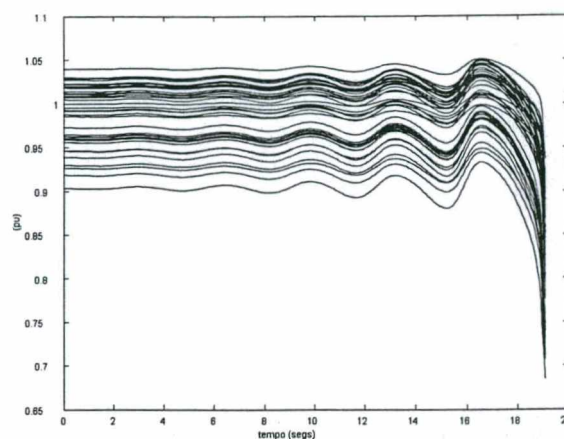


Figura 6.27 - Tensão nas Barras do SEE

Na situação pré-distúrbio foi detectado um par de autovalores complexos conjugados no semi-plano direito do eixo imaginário ($\lambda = 0.01145 \pm j \cdot 2.2098$), o que resulta no comportamento oscilatório crescente apresentado pelas tensões do SEE, conforme ilustra a figura 6.27. A determinação dos fatores de participação [53] para o modo instável fornece os resultados apresentados a seguir. Somente são apresentados os fatores de participação mais significativos.

- 0.1871 para a variável E'_q da máquina síncrona de Foz da Areia (ver apêndice A);
- 0.1343 para a variável X_2 do reg. de tensão de Foz da Areia (ver figura A.5);
- 0.1308 para a variável E'_q da máquina síncrona de Segredo (ver apêndice A);
- 0.0936 para a variável X_2 do reg. de tensão de Segredo (ver figura A.5);
- 0.1010 para a variável E'_q da máquina síncrona de S. Santiago (ver apêndice A);
- 0.0917 para a variável E'_q da máquina síncrona de Barracão (ver apêndice A).

Estes resultados mostram a forte associação do modo instável a variáveis de estado relacionadas as tensões do SEE, confirmando a existência de uma instabilidade de tensão no SEE.

6.1.2. Comentários Gerais sobre as Simulações Realizadas

Os resultados das simulações apresentados demonstram a capacidade e as potencialidades do programa implementado para simular uma grande faixa de aplicações em SEE. O programa mostrou-se bastante robusto para estas aplicações, não apresentando durante as simulações quaisquer problemas de convergência ou instabilidade numérica, salientando o excelente desempenho do esquema alternado entrelaçado implícito e da regra trapezoidal para estas apli-

cações.

Estas características permitem que uma ampla faixa de eventos e situações de operação sejam simuladas, o que torna o programa adequado para compor o módulo dinâmico de um simulador para ensino e treinamento. Aliado a estas características encontra-se ainda a grande versatilidade relativa a manutenção e incorporação de novos equipamentos ao programa, proporcionada pela programação orientada a objetos.

Todas as simulações apresentadas para a demonstração da capacidade do programa implementado foram realizadas em um microcomputador PENTIUM com 100 Mhz de “clock”. Os resultados relativos aos tempos de CPU para estas simulações são apresentados na tabela abaixo :

<i>Descrição do Teste</i>	<i>Tempo (seg)</i>		<i>Percentagem do Tempo Real (%)</i>
	<i>Simulação</i>	<i>CPU</i>	
TESTE A	5	0.55	11.00
TESTE B	600	88.54	14.75
TESTE C	600	135.99	22.66
TESTE D	600	90.79	15.13
TESTE E	19	2.14	11.26

Tabela 6.1 - Tempos de CPU para as simulações realizadas

Mostra-se na tabela 6.1 que o tempo de CPU foi inferior, para todos os casos, ao tempo real do sistema, o que possibilita simulações em tempo real para o sistema teste selecionado. Esta característica é de fundamental importância para simuladores de ensino e treinamento.

A seguir é realizada uma análise do desempenho computacional do programa implementado para diversas situações.

6.2. Resultados de Desempenho Computacional

Dentre os objetivos deste trabalho destaca-se a análise da viabilidade do emprego da Programação Orientada a Objetos e da linguagem C++ ao problema da simulação da dinâmica de SEE. Esta nova metodologia de programação surgiu como uma alternativa para minimizar os problemas associados ao desenvolvimento, manutenção e atualização de programas de grande porte. Entretanto, para algumas aplicações em SEE, esta metodologia apresentou um baixo de-

sempenho computacional, quando comparada com programas escritos em linguagens convencionais (FORTRAN) [21,23]. Isto ocorreu principalmente devido ao “*overhead*” associado ao uso da metodologia de programação, tais como envio de mensagens para os objetos, criação e destruição de objetos, etc [21]. Para um programa de fluxo de carga proposto em [21] o “*overhead*” associado ao uso da POO chega a 59.3% do tempo total de CPU.

Assim, foi realizada uma análise da performance computacional do programa implementado para simulações de curto e longo prazo. Esta análise procura relatar o desempenho computacional do programa orientado a objetos implementado, para SEE de várias dimensões e em várias plataformas computacionais.

A seguir são apresentados os SEE utilizados para a análise de desempenho computacional, sendo também apresentadas características das plataformas computacionais utilizadas.

6.2.1. Descrição dos SEE Utilizados

Foram utilizados cinco SEE testes de pequeno, médio e grande porte. Os parâmetros descritivos da dimensão destes SEE são apresentados na tabela abaixo.

<i>Sistema</i>	<i>Num. de Barras</i>	<i>Num. de LTs e Transf.</i>	<i>Num. de Cargas</i>	<i>Num. de Unidades. de Geração</i>	
				<i>Hidráulicas</i>	<i>Térmicas</i>
<i>SUL45</i>	45	72	25	8	3
<i>SSUD188</i>	188	264	79	22	3
<i>SSUD340</i>	340	684	189	40	9
<i>SSUD730</i>	730	1146	392	75	7
<i>SSUD2000</i>	1916	2788	1157	253	7

Tabela 6.2 - SEE utilizados para a Análise de Performance Computacional

O sistema SUL45 é um equivalente do sistema elétrico da região Sul do Brasil. Todos os demais sistemas são equivalentes, em diversos níveis de detalhes, do sistema interligado das regiões Sul-Sudeste do Brasil, onde foram representadas algumas subáreas por equivalentes estáticos de rede. Os parâmetros da tabela 6.2 relativos ao *Número de Unidades de Geração* representam apenas as unidades que foram representadas por modelos dinâmicos.

6.2.2. Descrição das Plataformas Computacionais Utilizadas

A avaliação do desempenho computacional do programa foi realizada em várias plataformas computacionais, uma vez que o desempenho de um programa é influenciado por uma eficiente exploração da arquitetura do computador, realizada pelo compilador e pelo sistema operacional. Assim, a utilização de várias plataformas computacionais expande a análise de desempenho da POO e, especificamente, do programa implementado para outras arquiteturas e compiladores.

A seguir são apresentadas as características das plataformas utilizadas :

INTEL : a plataforma INTEL representa a família de microcomputadores do tipo IBM-PC (*Personal Computer*), mundialmente difundidos e disponíveis comercialmente a um baixíssimo custo. Esta plataforma foi representada por um computador da linha PENTIUM com *clock* de 100MHz, 16 MB de memória RAM, 512 KB de memória *cache* e disco de 1.23 GB. O compilador utilizado sob esta plataforma foi o WATCOM C++ versão 10.0.

IBM/SP1 : o sistema IBM 9076 do Laboratório Nacional de Computação Científica - LNCC é um computador paralelo com arquitetura de memória distribuída. Este sistema possui 16 processadores RISC/6000 370, contendo, cada um, 256 MB de memória RAM, 32 KB de memória *cache*, disco de 2GB e um desempenho de pico de 125 Mflops. O sistema totaliza 2Gflops de desempenho de pico. O disco local é utilizado para armazenamento de arquivos temporários e atividades de paginação por parte do sistema operacional. A área de dados é suprida por dois *file servers* (FS) RISC/6000 980 com 55 GB de disco no total. O acesso ao sistema paralelo IBM/SP1 é controlado por uma máquina *front end* RISC/6000 570. O dispositivo HPS - *High Performance Switch* desta máquina, responsável pela transferência de dados entre os processadores, tem capacidade nominal de 40 MB/s [85].

IBM/SP2 : computador paralelo de memória distribuída da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, com 4 processadores do tipo POWER 2, sendo 2 nós finos (tipo II *thin* 66) e 2 nós largos (tipo III *wide* 66). Todos possuem 4 unidades de ponto flutuante totalizando 266 Mflops de performance de pico e 128 MB de memória RAM, além de 4.5 GB de disco. Os nós largos desta máquina diferem dos nós finos no tamanho da *cache*, 4 vezes maior nos nós largos (64 KB nos nós finos e 256 KB nos nós largos), e na capacidade de transmissão do barramento de dados. O sistema totaliza 1 Gflop de desempenho de pico. O dispositivo HPS desta

máquina tem uma capacidade nominal de transferência de dados de 40 MB/s. A estação de controle deste sistema é uma RISC/6000 250 com 64 MB de memória e 2 GB de disco [85].

Os computadores IBM/SP1 e IBM/SP2 são computadores paralelos de grande porte (16 e 4 processadores respectivamente). No entanto, neste trabalho, apenas programação seqüencial foi utilizada para a avaliação do desempenho computacional do programa orientado a objetos implementado. Assim, utilizou-se para a execução do programa apenas um nó do IBM/SP1 e, devido a diferenças de arquitetura, dois nós do IBM/SP2 (*nó fino* e *nó largo*) em operações seqüenciais.

6.2.3. Comparação de Desempenho com o Programa ANATEM

Nas aplicações da POO a SEE registram-se referências da perda da eficiência computacional dos programas quando comparados com programas tradicionalmente escritos em FORTRAN [21,23]. Assim, foram realizados estudos comparativos entre o programa orientado a objetos implementado e um programa comercial escrito em FORTRAN para a simulação da dinâmica de SEE. O programa em FORTRAN utilizado foi o *Programa para Análise de Transitórios Eletromecânicos* - ANATEM [50] desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL. Este programa tem sido utilizado pelas empresas do setor elétrico brasileiro em estudos do comportamento dinâmico do SEE.

A análise comparativa é limitada a estudos de estabilidade transitória, uma vez que o programa ANATEM foi concebido apenas para este fim. Tanto o programa orientado a objetos implementado (SIMSP), quanto o programa ANATEM, utilizam o esquema alternado entrelaçado implícito para a solução do conjunto de equações algébrico-diferenciais do SEE, sendo que, para esta análise, ambos os programas utilizaram a mesma modelagem, mesma tolerância para convergência do processo alternado de solução, mesmo passo de integração, e mesmo critério de convergência. A modelagem e os parâmetros utilizados nas simulação são descritos a seguir.

- Unidades de Geração
 - * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
 - * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2);
- Cargas : modelo polinomial com 100% impedância constante.

Os parâmetros adotados para as simulações são :

- Tempo de Simulação : 5.0 segs.;
- Passo de Integração : 0.005 segs.
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.0001

O distúrbio simulado foi um curto circuito em uma das barras do SEE com eliminação do defeito pelo chaveamento de uma LT simultaneamente em seus dois extremos.

Os resultados relativos aos tempos de CPU para as simulações efetuadas são apresentados na tabela 6.3. Estes resultados correspondem a tempo total de execução dos programas, estando incluídos no cômputo os atrasos referentes ao acesso a disco durante a leitura dos dados e a preparação dos dados para a simulação (a operação de escrita dos relatórios de saída foi suprimida para ambos os programas). Os resultados apresentados para o PENTIUM correspondem a tempo de CPU para a simulação apenas, excluídos os atrasos devidos a acesso a disco e preparação dos dados para a simulação.

<i>Descrição</i>		<i>Tempo de CPU para os Sistemas (segs.)</i>				
<i>Máquina</i>	<i>Programa</i>	<i>SUL45</i>	<i>SSUD188</i>	<i>SSUD340</i>	<i>SSUD730</i>	<i>SSUD2000</i>
PENTIUM	ANATEM	2.84	5.21	12.19	23.06	-----
	SIMSP	2.09	4.67	13.46	19.83	61.08
IBM/SP1	ANATEM	2.55	5.21	12.62	25.05	72.08
	SIMSP	1.56	4.50	12.29	22.32	83.93
IBM/SP2 (<i>nó fino</i>)	ANATEM	1.77	3.40	8.43	17.02	47.78
	SIMSP	1.20	3.09	9.25	18.39	71.05
IBM/SP2 (<i>nó largo</i>)	ANATEM	1.72	3.32	8.24	15.99	45.33
	SIMSP	1.18	2.59	6.99	12.78	53.66

Tabela 6.3 - Comparação entre os Tempos de CPU para os Programas SIMSP - ANATEM

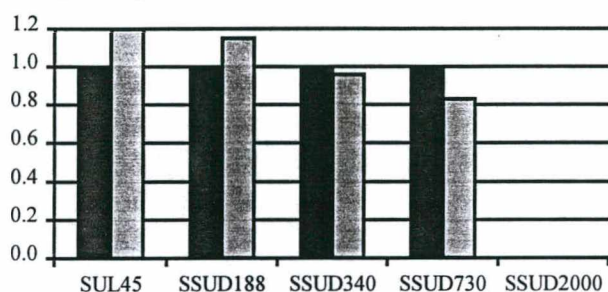
O resultado para o SEE *SSUD2000* não foi apresentado para o programa ANATEM no computador PENTIUM em virtude de limitações no dimensionamento deste programa.

Observou-se dos resultados obtidos, uma diferença no número médio de iterações por passo de integração entre ambos os programas, dificultando a análise comparativa de desempenho. Isto ocorreu provavelmente devido a diferentes considerações para o critério de convergência adotado pelos programas. Assim, para facilitar a análise de desempenho, os tempos de CPU foram ponderados pelo número médio de iterações por passo de integração, resultando em um índice de desempenho definido na equação 6.1.

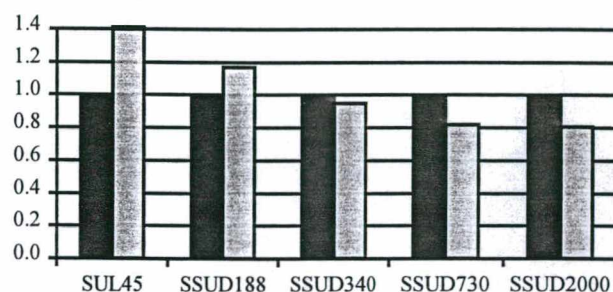
$$desempenho = \frac{\text{tempo de CPU}}{n^{\circ} \text{ medio de iters. por passo de integracao}} \quad (6.1)$$

Este índice relaciona tempo de CPU e número de iterações para ambos os programas. Os resultados são ilustrados graficamente nas figuras 6.28 e 6.29, sendo apresentados normalizados em relação ao programa SIMSP.

desempenho para o PENTIUM



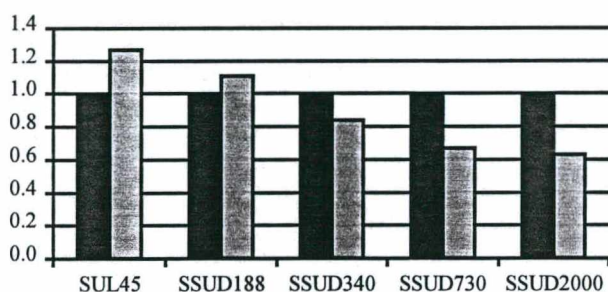
desempenho para o IBM/SP1



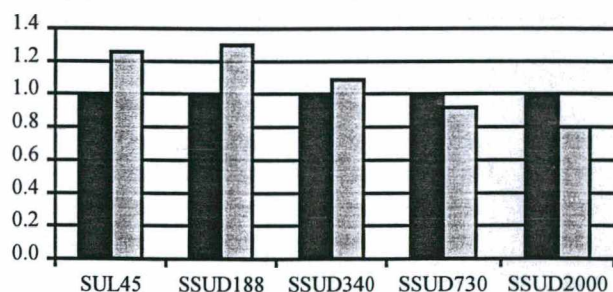
Legenda : ■ SIMSP
■ ANATEM

Figura 6.28 - Comparação de Desempenho entre os Programas ANATEM - SIMSP

desemp para o IBM/SP2 (nó fino)



desemp para o IBM/SP2 (nó largo)



Legenda : ■ SIMSP
■ ANATEM

Figura 6.29 - Comparação de Desempenho entre os Programas ANATEM - SIMSP

Da análise dos resultados apresentados graficamente observa-se :

- O desempenho do programa SIMSP mostrou-se superior para os SEE de menor dimensão. No entanto, esta superioridade decai a medida que a dimensão do SEE aumenta, tornando-se inferior ao desempenho do programa ANATEM para SEE com dimensão maior que 340 barras (SSUD340). Isto ocorre para todas as plataformas computacionais.
- Dentre os SEE de médio e grande porte, a superioridade de desempenho do programa ANATEM não ultrapassa 20% para a maioria das plataformas computacionais, exceto para o IBM/SP2 (nó fino) onde esta superioridade chega a 37%. Isto ocorre possivelmente devido a um melhor aproveitamento de características específicas da arquitetura deste computador pelo com-

pilador FORTRAN, tais como a utilização da memória *cache*, do barramento de dados e, principalmente, das unidades de ponto flutuante.

Nas simulações realizadas para comparação de desempenho entre os programas nenhuma opção de otimização foi ativada durante a compilação dos programas. Entretanto o desempenho destes pode ser significativamente alterado quando tais opções são ativadas. Os resultados apresentados a seguir demonstram o ganho de desempenho fornecido por otimizações realizadas durante a compilação dos programas.

6.2.3.1. Desempenho das Otimizações de Compilador

O tempo de execução de uma simulação pode ser reduzido substancialmente devido a otimizações realizadas pelo compilador durante a etapa de compilação dos programas. Estas otimizações exploram eficientemente características específicas da arquitetura do computador. A seguir são apresentados, para ambos os programas, os ganhos de desempenho obtidos com as otimizações realizadas pelo compilador para a plataforma INTEL.

O ganho de desempenho para os demais computadores somente é apresentado para o programa SIMSP, devido a não disponibilidade na UFSC, para estas plataformas computacionais, de versões do programa ANATEM compilado com as opções de otimização ativadas.

Os resultados apresentados correspondem somente aos níveis de otimização mínimo (S/O - sem otimização) e máximo (-O para o PENTIUM e -O3 para os demais), uma vez que não foram encontradas diferenças significativas entre os níveis intermediários e o nível máximo.

Plataforma INTEL (PENTIUM)

Os resultados provenientes das simulação com e sem otimização para ambos os programas são apresentados na tabela 6.4 abaixo.

<i>Descrição</i>		<i>Tempo de CPU para os Sistemas (segs)</i>				
<i>Programa</i>	<i>Otimização</i>	<i>SUL45</i>	<i>SSUD188</i>	<i>SSUD340</i>	<i>SSUD730</i>	<i>SSUD2000</i>
ANATEM	<i>S/O</i>	2.84	5.21	12.19	23.03	-----
	<i>-O</i>	2.25	3.67	7.68	14.55	-----
SIMSP	<i>S/O</i>	2.09	4.67	13.46	19.83	61.08
	<i>-O</i>	1.43	3.41	9.40	13.51	45.26

Tabela 6.4 - Desempenho das Otimizações de Compilação para a Plataforma Intel

Plataformas IBM/SP1 e IBM/SP2 :

Os resultados com e sem otimização para o programa SIMSP nas plataformas IBM/SP1 e IBM/SP2 são apresentados na tabela 6.5 abaixo.

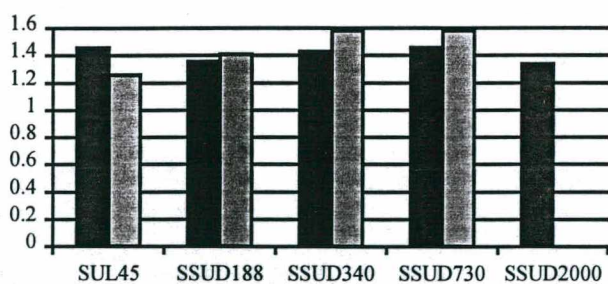
<i>Descrição</i>		<i>Tempo de CPU para os Sistemas (segs.)</i>				
<i>Máquina</i>	<i>Otimização</i>	<i>SUL45</i>	<i>SSUD188</i>	<i>SSUD340</i>	<i>SSUD730</i>	<i>SSUD2000</i>
IBM/SP1	<i>S/O</i>	0.99	5.06	12.20	22.65	67.95
	<i>-O3</i>	0.56	3.26	8.25	14.81	45.69
IBM/SP2 (<i>nó fino</i>)	<i>S/O</i>	0.72	3.46	9.20	17.95	58.01
	<i>-O3</i>	0.36	2.07	6.26	13.05	42.27
IBM/SP2 (<i>nó largo</i>)	<i>S/O</i>	0.68	2.99	6.86	12.83	43.94
	<i>-O3</i>	0.35	1.53	3.44	6.44	13.87

Tabela 6.5 - Desempenho das Otimização de Compilação para as demais Plataformas

O ganho de desempenho obtido com a ativação das opções de compilação é apresentado graficamente na figura 6.30. Sendo determinado da seguinte forma :

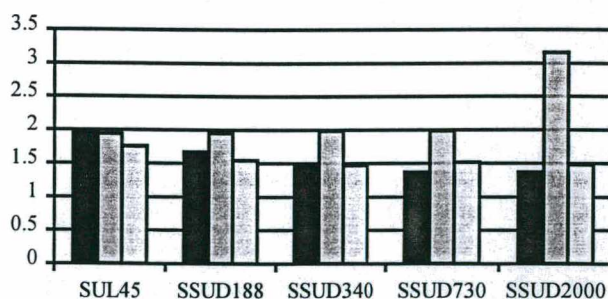
$$\text{ganho} = \frac{\text{tempo de CPU sem otimizacao (S / O)}}{\text{tempo de CPU com otimizacao (-O)}} \quad (6.1)$$

ganho para a Plataforma INTEL (PENTIUM)



Legenda : ■ SIMSP
■ ANATEM

ganho para a Plataforma IBM/SP1 e IBM/SP2



Legenda : ■ SP2 (*nó fino*)
■ SP2 (*nó largo*)
■ SP1

Figura 6.30 - Ganho de Desempenho Devido as Otimizações de Compilação

Dos resultados apresentados graficamente observa-se uma ligeira superioridade do ganho de desempenho conseguido com o compilador FORTRAN em relação ao compilador C++ para a plataforma INTEL. Ambos os compiladores conseguem um ganho de mais de 1.26 para todas as simulações. Isto demonstra a excelente performance da exploração da arquitetura INTEL (PENTIUM) pelos compiladores utilizados. Para as demais plataformas o ganho conseguido com

a ativação das opções de otimização é ainda superior aos ganhos da plataforma INTEL, chegando a alcançar 3.16 para o IBM/SP2 (*nó largo*).

Observou-se dos resultados obtidos que o ganho de desempenho para o IBM/SP2 (*nó largo*) cresce juntamente com a dimensão dos SEE, o que não acontece para os demais computadores. Isto pode ser atribuído a uma eficiente utilização da arquitetura do barramento de dados desta máquina, tornando o processo de transferência de dados da memória principal para a memória “*cache*” mais eficiente quando grandes massas de dados necessitam ser transferidas.

6.2.3.2. Avaliação Geral dos Resultados

Os resultados comparativos entre o desempenho computacional para ambos os programas sob a plataforma INTEL indicam que ambos (ANATEM - SIMSP) são comparáveis quanto a performance computacional. Uma ligeira superioridade pode ser identificada no programa ANATEM para os sistemas de maior dimensão. Entretanto esta superioridade não excede 20%.

O ganho de desempenho apresentado pela ativação das opções de otimização reduz substancialmente o tempo de processamento das simulações, sobretudo para os SEE de maior porte. Entretanto estas otimizações são apenas recomendáveis para utilização nas versões finais do programa, devendo ser mantidas desativadas nas fases de desenvolvimento e validação dos resultados, uma vez que podem ocultar a detecção de erros no programa.

Durante a fase de desenvolvimento do programa SIMSP, foi identificada uma superioridade da linguagem FORTRAN no tratamento de variáveis complexas. Este tipo de variável é definida internamente pelos compiladores FORTRAN, o que não ocorre com os compiladores C++. Assim, é necessário definir objetos para representar as variáveis complexas e suas operações elementares, causando um “*overhead*” adicional durante as operações com números complexos em C++.

Várias tentativas de eliminação deste “*overhead*” foram testadas sem sucesso, inclusive a metodologia recomendada em [83] para operações com números complexos, através de funções declaradas como “*inline*”. Esta declaração deveria realizar uma substituição automática do código correspondente a função durante a fase de compilação, eliminando o “*overhead*”. Entretanto isto não se verifica. Por fim, foi realizada uma substituição do código relativo às operações elementares com números complexos diretamente nas partes do programa que utilizam intensivamente tais operações. Esta metodologia foi adotada para a solução das equações da rede (constituída basicamente de operações com números complexos e onde reside o maior esforço

a ativação das opções de otimização é ainda superior aos ganhos da plataforma INTEL, chegando a alcançar 3.16 para o IBM/SP2 (*nó largo*).

Observou-se dos resultados obtidos que o ganho de desempenho para o IBM/SP2 (*nó largo*) cresce juntamente com a dimensão dos SEE, o que não acontece para os demais computadores. Isto pode ser atribuído a uma eficiente utilização da arquitetura do barramento de dados desta máquina, tornando o processo de transferência de dados da memória principal para a memória “*cache*” mais eficiente quando grandes massas de dados necessitam ser transferidas.

6.2.3.2. Avaliação Geral dos Resultados

Os resultados comparativos entre o desempenho computacional para ambos os programas sob a plataforma INTEL indicam que ambos (ANATEM - SIMSP) são comparáveis quanto a performance computacional. Uma ligeira superioridade pode ser identificada no programa ANATEM para os sistemas de maior dimensão. Entretanto esta superioridade não excede 20%.

O ganho de desempenho apresentado pela ativação das opções de otimização reduz substancialmente o tempo de processamento das simulações, sobretudo para os SEE de maior porte. Entretanto estas otimizações são apenas recomendáveis para utilização nas versões finais do programa, devendo ser mantidas desativadas nas fases de desenvolvimento e validação dos resultados, uma vez que podem ocultar a detecção de erros no programa.

Durante a fase de desenvolvimento do programa SIMSP, foi identificada uma superioridade da linguagem FORTRAN no tratamento de variáveis complexas. Este tipo de variável é definida internamente pelos compiladores FORTRAN, o que não ocorre com os compiladores C++. Assim, é necessário definir objetos para representar as variáveis complexas e suas operações elementares, causando um “*overhead*” adicional durante as operações com números complexos em C++.

Várias tentativas de eliminação deste “*overhead*” foram testadas sem sucesso, inclusive a metodologia recomendada em [83] para operações com números complexos, através de funções declaradas como “*inline*”. Esta declaração deveria realizar uma substituição automática do código correspondente a função durante a fase de compilação, eliminando o “*overhead*”. Entretanto isto não se verifica. Por fim, foi realizada uma substituição do código relativo às operações elementares com números complexos diretamente nas partes do programa que utilizam intensivamente tais operações. Esta metodologia foi adotada para a solução das equações da rede (constituída basicamente de operações com números complexos e onde reside o maior esforço

computacional do esquema alternado entrelaçado implícito). Para as demais partes do programa que utilizam operações com números complexos, como a fatoração *LU* e a determinação das injeções de corrente dos elementos do SEE, utilizaram-se as operações usuais definidas para os números complexos (através de operadores sobrecarregados e diretivas “*inline*”).

A tabela abaixo apresenta o desempenho das operações com números complexos em C++. Os resultados para o C++ correspondem ao desempenho destas operações com a metodologia recomendada (“*inline*”) [83] e com a metodologia adotada neste trabalho para a solução das equações da rede (subst. código). Os resultados estão normalizados pelas mesmas operações elementares realizadas em FORTRAN.

<i>Operações com Num. Complexos</i>	<i>FORTRAN</i>	<i>C++</i>	
		<i>funções inline</i>	<i>subst. código</i>
+	1.00	2.11	0.85
*	1.00	1.94	1.26

Tabela 6.6 - Desempenho das Operações Elementares em FORTRAN e C++

Observa-se que a realização de operações com números complexos através da metodologia “*inline*” é cerca de 2 vezes mais lenta do que a mesma operação em FORTRAN. No entanto, com o emprego das substituições de código, os desempenhos se equivalem. A adoção de substituições deste tipo em todo o programa poderá minimizar ainda mais a superioridade apresentada pelo programa ANATEM para os SEE de dimensão elevada, onde o grande número de máquinas síncronas intensifica o uso de operações com números complexos durante, principalmente, a determinação das injeções de corrente destes elementos.

A seguir será feita uma análise do desempenho do programa SIMSP para simulações de curta e longa duração, destacando-se o crescimento do tempo computacional a medida que aumenta a dimensão do SEE e avaliando-se a máxima dimensão possível com tempo de simulação inferior ao tempo real do sistema para ambas simulações.

6.2.4. Desempenho Computacional em Simulações de Curto Prazo

Simulações de curto prazo são caracterizadas pelos curtos períodos de simulação e pela não representação de elementos do SEE com pouca influência para o comportamento dinâmico do SEE no intervalo de tempo de interesse. A modelagem para este tipo de estudo geralmente resume-se a representação das máquinas síncronas e seus sistemas de excitação para as unidades

de geração, e a representação das cargas pelo modelo polinomial.

Neste item é apresentado, para o programa implementado, uma avaliação do tempo computacional utilizado para simulações deste tipo, e do crescimento deste tempo com a dimensão do SEE.

A modelagem adotada para as simulações de curto prazo é descrita a seguir :

- Unidades de Geração
 - * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
 - * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2);
- Cargas : modelo polinomial com 100% impedância constante.

Os parâmetros utilizados para as simulações são os seguintes :

- Tempo de Simulação : 5.0 segs.;
- Passo de Integração : 0.01 segs.
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001

A tabela 6.7 apresenta os resultados relativos ao tempo de CPU nas simulações de curto prazo para os diversos SEE testes. São apresentados também resultados para todas as plataformas computacionais utilizadas.

<i>Descrição das</i>		<i>Tempo de CPU para os Sistemas (segs)</i>				
<i>Máquinas</i>		<i>SUL45</i>	<i>SSUD188</i>	<i>SSUD340</i>	<i>SSUD730</i>	<i>SSUD2000</i>
PENTIUM		0.55	1.49	3.30	5.71	19.56
IBM/SP1		0.30	1.42	3.68	7.42	24.09
IBM/SP2	<i>(nó fino)</i>	0.21	0.91	2.75	6.55	22.49
	<i>(nó largo)</i>	0.22	0.67	1.74	3.14	13.59

Tabela 6.7 - Tempo de Processamento para Simulações de Curto Prazo

Mostra-se na tabela 6.8 que o programa orientado a objetos implementado consegue tempo de CPU inferior ao tempo de dinâmica simulado para todos os SEE com até 340 barras (*SSUD340*), sob todas as plataformas computacionais. Para o IBM/SP2 (*nó largo*) é alcançado tempo de CPU inferior ao tempo real para sistemas de até 730 barras (*SSUD730*). Isto é melhor ilustrado através da figura 6.31, onde apresentam-se dispostos graficamente os tempos de processamento para todos os SEE sob todas as plataformas. Nesta figura todas as barras inferiores a linha correspondente aos 5.0 segs. de simulação (destacada na figura como *Tempo Real*) conse-

guem tempo de CPU inferior ao tempo real do sistema.

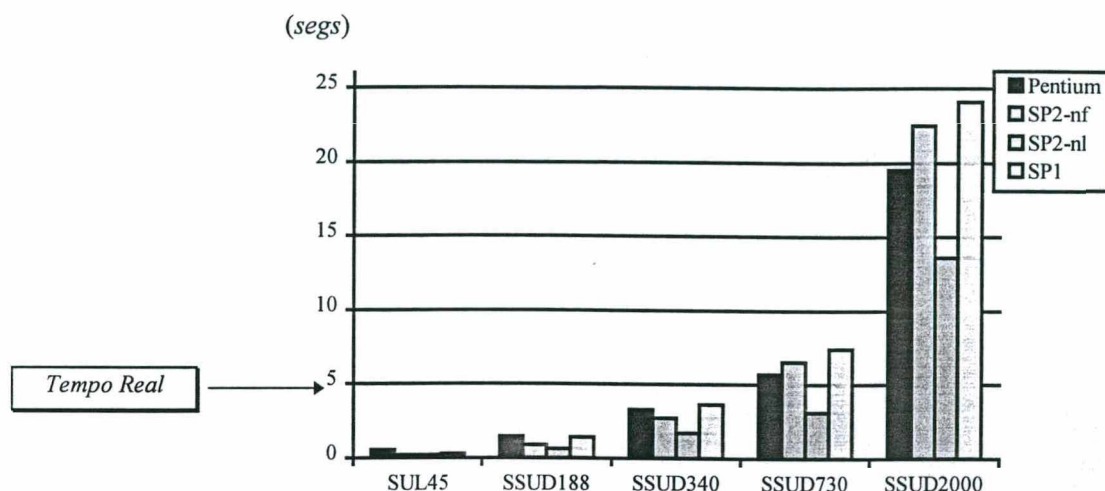


Figura 6.31 - Desempenho para Simulações de Curta Duração

A figura 6.31 ilustra também o crescimento do tempo computacional com a dimensão do SEE. Mostra-se que o tempo de processamento do SEE *SSUD2000* é muitas vezes superior ao tempo real do sistema.

6.2.5. Desempenho Computacional em Simulações de Longo Prazo

Simulações de longo prazo são caracterizadas pela representação sofisticada para as unidades de geração e cargas e pelos longos períodos de simulação. Um eficiente desempenho computacional para simulações de longo prazo é de fundamental importância para a operação em tempo real dos simuladores para ensino e treinamento, visto que este desempenho determina a dimensão máxima dos SEE que serão simulados em tempo real.

Neste item é apresentado, para o programa implementado, uma avaliação do tempo computacional utilizado para este tipo de simulação e do crescimento deste tempo com a dimensão do SEE.

A modelagem utilizada para as simulações de longo prazo é descrita a seguir :

- Unidades de Geração
 - * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
 - * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2);
 - * Turbina : modelo para turbina térmica ou hidráulica (ver item 4.2.2);

- * Regulador de velocidade : adequado ao tipo de turbina (ver item 4.4.4);
- * Caldeira : modelo de caldeira do tipo Tambor (ver item 4.2.5);
- Cargas : modelo polinomial composto por parcelas de potência e impedância constante;

Os parâmetros adotados para as simulações são os seguintes :

- Tempo de Simulação : 5.0 min (300.0 segs.)
- Passo de Integração : 0.01 segs.
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001

A tabela 6.8 apresenta os resultados relativos ao tempo de CPU para as simulações de longo prazo para os diversos SEE teste.

Descrição das		Tempo de CPU para os Sistemas (segs.)				
Máquinas		SUL45	SSUD188	SSUD340	SSUD730	SSUD2000
PENTIUM		44.21	108.97	225.80	431.06	1390.70
IBM/SP1		31.67	93.96	218.23	433.90	1230.81
IBM/SP2	(nó fino)	21.16	65.14	182.73	384.88	1117.20
	(nó largo)	20.60	47.93	106.34	217.13	740.92

Tabela 6.8 - Tempo de Processamento para Simulações de Longo Prazo

Os resultados mostrados para as simulações de longo prazo são semelhantes aos encontrados para as simulações de curto prazo quanto as dimensões máximas alcançadas com tempo de CPU inferior ao tempo real do sistema. A figura 6.32 ilustra melhor estes resultados.

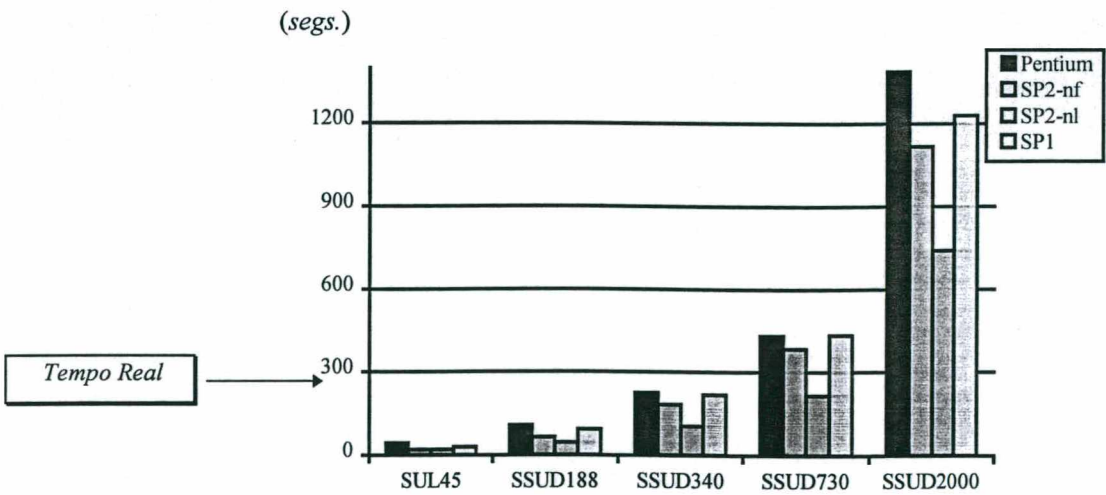


Figura 6.32 - Desempenho para Simulações de Longo Prazo

Os resultados apresentados viabilizam a utilização de SEE de até 730 barras para simuladores de ensino e treinamento em tempo real, sendo necessário, para isto, utilizar um computador do tipo IBM/SP2 (*nó largo*). Em SEE de maior porte, entretanto, a simulação em tempo real é inviável para a programação seqüencial devido aos altos tempos de CPU requeridos para a simulação (para o computador PENTIUM, por exemplo, foram necessários 23 min. e 10 segs. de tempo de CPU para simular 5 min. do comportamento dinâmico do SEE *SSUD2000*). Técnicas de processamento paralelo, no entanto, representam uma alternativa para a redução dos tempos de CPU apresentados, representando a possibilidade mais viável para o uso de SEE de grande porte em simuladores de ensino e treinamento em tempo real.

Outras técnicas para redução do tempo de CPU tem sido utilizadas para simulações de longo prazo [5,12,13,15], como a utilização de modelos simplificados, chaveamento de modelos, variação automática do passo de integração, etc. Dentre estas, a variação do passo de integração tem sido bastante utilizada para simuladores de longo prazo [12,13,15]. Assim, o item a seguir apresenta uma análise do desempenho de algumas técnicas de variação do passo de integração para simuladores de longo prazo.

6.2.5.1. Variação Automática do Passo de Integração

Os longos períodos de tempo simulados nos estudos de longo prazo implicam em um também longo tempo de CPU. Esta situação agrava-se com o crescimento da dimensão dos SEE. Algumas técnicas tem sido utilizadas para redução deste tempo de CPU [5,12,13,15]. Tais técnicas baseiam-se no fato de que, durante as simulações de longo prazo as oscilações transitórias do SEE, devido a um distúrbio qualquer, são rapidamente amortecidas, frente ao intervalo de tempo total da simulação, restando então apenas as oscilações mais lentas do SEE para a maior parte da simulação. Assim, é possível efetuar simplificações nos modelos dos elementos, desprezando fenômenos associados a baixas constantes de tempo, afim de reduzir o número de operações matemáticas realizadas durante a solução das equações destes elementos e, principalmente, possibilitar o aumento do passo de integração a valores bastante elevados. Com isto consegue-se uma substancial redução no tempo de CPU para estas simulações [12,13,15].

A seguir são apresentados resultados da aplicação de algumas metodologias heurísticas para variação do passo de integração para programas de simulação baseados no esquema alternado. Nenhuma simplificação é realizada nos modelos adotados para as simulações.

A adoção do esquema alternado entrelaçado implícito e da regra trapezoidal possibilita a

utilização de metodologias para variação do passo de integração, uma vez que a regra trapezoidal possui a característica de ser auto-inicializável (ou seja, não depende de informações relativas a passos de integração anteriores).

Três estratégias foram adotadas para a variação do passo de integração :

- *Estratégia A* : estratégia proposta em [30]. Nela o passo de integração atual é dobrado sempre que o número de iterações do processo alternado de solução é inferior a um valor mínimo especificado, e reduzido a metade sempre que o número de iterações é superior a um valor máximo especificado. Esta estratégia assume que o número de iterações do processo alternado é uma boa estimativa do erro local da regra trapezoidal, sendo utilizado como referência para o controle do passo de integração [38];
- *Estratégia B* : nesta estratégia o passo de integração atual é dobrado após decorrido um tempo de espera. Este tempo é inicializado sempre que ocorre um evento no SEE ou uma alteração no passo de integração. Após o aumento do passo de integração analisa-se o número de iterações do processo alternado de solução por alguns passos de integração. Se o número de iterações for superior ao dobro do número de iterações médio do último intervalo de espera o passo é reduzido a metade e inicializa-se novamente a contagem de tempo para uma nova tentativa. Testes demonstraram que um tempo de espera de 5.0 segs. é suficiente para o amortecimento das oscilações transitórias após um distúrbio quando então é realizada a primeira tentativa de variação do passo.
- *Estratégia C* : esta estratégia é idêntica a anterior, no entanto o aumento do passo de integração dá-se a incrementos fixos pré-definidos (nos anteriores o aumento efetuava-se através da multiplicação/divisão do passo atual por um fator 2). Com isto consegue-se passos de integração intermediários aos indicados pelas estratégias anteriores.

Para todas as estratégias o passo de integração é automaticamente reduzido ao seu valor mínimo após um evento qualquer no SEE.

A tabela 6.10 apresenta os resultados da aplicação das estratégias de controle do passo de integração para simulações de longo prazo, comparativamente a simulações com passo de integração fixo.

A faixa de variação imposta às estratégias de controle do passo de integração é de 0.01 a 0.03 segs.

<i>Estratégia de Controle do Passo de Integração</i>		<i>Tempo de CPU para os Sistemas (segs.)</i>				
		<i>SUL45</i>	<i>SSUD188</i>	<i>SSUD340</i>	<i>SSUD730</i>	<i>SSUD2000</i>
Fixo	<i>0.01 segs.</i>	44.21	108.97	225.80	431.06	1390.70
Variável	<i>Estratégia A</i>	38.83	60.75	116.11	234.09	Ø
	<i>Estratégia B</i>	34.94	62.78	120.84	236.56	761.54
	<i>Estratégia C</i>	Ø	46.24	84.70	171.54	Ø

Tabela 6.9 - Desempenho das Estratégias de Variação Automática do Passo de Integração

Os símbolos Ø na tabela indicam que o processo alternado de solução não convergiu em algum instante da simulação.

Os resultados da tabela 6.9 mostram uma substancial redução do tempo de CPU para as simulações com passo de integração variável quando comparadas com simulações com passo de integração fixo (0.01 segs.). Testes mostraram que não é possível utilizar passos de integração maiores que 0.03 segs. para os modelos utilizados, sendo que a utilização de um passo de integração desta ordem em simulações com passo fixo causa divergência no processo alternado de solução para todos os SEE teste.

Os resultados apresentados apesar de não totalmente satisfatórios, indicam boas perspectivas para a redução do tempo de CPU através da variação automática do passo de integração em simuladores de longo prazo. Entretanto estudos mais detalhados devem ser realizados em busca de outras estratégias de variação do passo de integração e/ou técnicas de redução do tempo de CPU. Uma alternativa para a redução do tempo de CPU é a utilização combinada da variação automática do passo de integração com técnicas de chaveamento de modelos. Isto permite a utilização de passos de integração mais elevados durante as simulações de longo prazo.

6.2.6. Análise de Desempenho entre a Modelagem para Simulações de Curto Prazo e a Modelagem para Simulações de Longo Prazo

Simulações de longo prazo utilizam uma representação mais sofisticada para as unidades de geração e cargas do que as simulações convencionais de curto prazo. Em virtude disto o esforço computacional para estas simulações é mais elevado, consequentemente o tempo de CPU utilizado para estas simulações também aumenta. Este item apresenta uma análise do crescimento do tempo de CPU com a sofisticação da representação das unidades de geração e cargas.

São apresentados resultados para SEE de várias dimensões e em diversas plataformas computacionais.

Para esta análise foram simulados eventos e intervalos de tempo de simulação idênticos para os SEE teste. As unidades de geração foram representadas com os elementos convencionalmente utilizados em simulações de curta duração, sendo incluídos novos elementos para a representação sofisticada utilizada em simulações de longa duração. Uma descrição da representação das unidades de geração e das cargas em ambos os casos é apresentada a seguir.

Modelagem utilizada nas Simulações de Curto Prazo

- Unidades de Geração
 - * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
 - * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2);
- Cargas : modelo polinomial com 100% impedância constante.

Modelagem utilizada nas Simulações de Longo Prazo

- Unidades de Geração
 - * Máquina Síncrona : modelo IV (ver item A.1.1.2);
 - * Regulador de tensão : modelo IEEE Tipo 1 (ver item A.1.2.2);
 - * Turbina : modelo para turbina térmica ou hidráulica (ver item A.1.5);
 - * Regulador de velocidade : adequado ao tipo de turbina (ver item A.1.4);
 - * Caldeira : modelo de caldeira do tipo Tambor (ver item A.1.6);
- Cargas : modelo polinomial composto por parcelas de potência e impedância constante;

Os parâmetros adotados para as simulações são descritos abaixo :

- Tempo de Simulação : 5.0 segs.;
- Passo de Integração : 0.01 segs.
- Tolerância de convergência do processo alternado de solução : 0.001

A tabela 6.10 apresenta os tempos de CPU obtidos com as simulações realizadas.

Descrição		Tempo de CPU para os Sistemas (segs.)				
Máquina	Modelagem	SUL45	SSUD188	SSUD340	SSUD730	SSUD2000
PENTIUM	convencional	0.55	1.49	3.30	5.71	19.56
	sofisticada	0.71	2.04	3.96	7.14	24.49
IBM/SP1	convencional	0.30	1.42	3.68	7.42	24.09
	sofisticada	0.52	2.12	4.36	8.63	29.53
IBM/SP2 (nó fino)	convencional	0.21	0.91	2.75	6.55	22.49
	sofisticada	0.33	1.28	3.31	7.58	26.51
IBM/SP2 (nó largo)	convencional	0.22	0.67	1.74	3.14	13.59
	sofisticada	0.35	0.93	2.07	4.11	17.06

Tabela 6.10 - Desempenho Computacional para a Modelagem *convencional* x *sofisticada*

A análise dos resultados da tabela 6.10 indicam um acréscimo médio no tempo total de CPU de 34% para os SEE de pequeno porte (*SUL45* e *SSUS188*), nas simulações de longo prazo, ao passo que os SEE de médio e grande porte (*SSUD340*, *SSUD730* e *SSUD2000*) apresentam um acréscimo médio de apenas 17.8%. Isto ocorre devido a maior participação, na composição do tempo de CPU, da solução das equações algébrico-diferenciais dos elementos para os SEE de pequeno porte. Para os SEE de médio e grande porte esta participação é reduzida em função do crescimento do tempo utilizado para a solução da rede elétrica, resultando em menores acréscimos percentuais de tempo. O gráfico da figura 6.33 apresenta a composição percentual do tempo de CPU de simulação para os SEE em simulações de curto e longo prazo. Utilizou-se apenas a plataforma INTEL (PENTIUM) para esta análise.

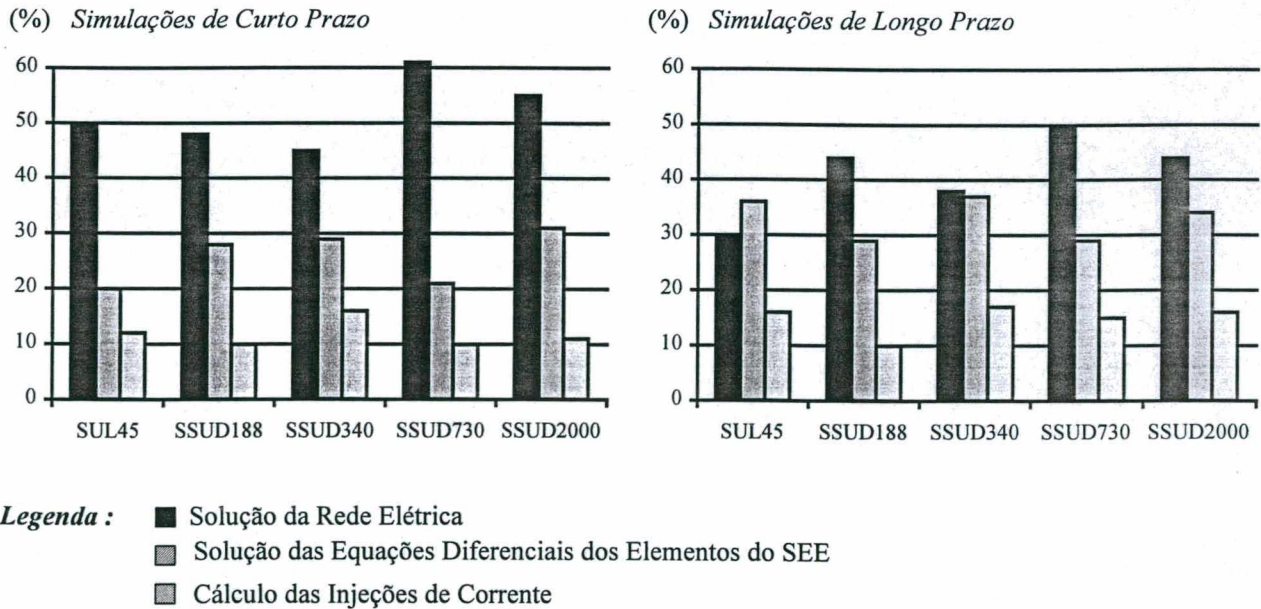


Figura 6.33 - Composição dos Tempos de CPU para Simulações de Curto e Longo Prazo

Os resultados da figura 6.33 mostram um aumento médio de 10.6% no tempo utilizado para a solução das equações diferenciais dos elementos do SEE nas simulações de longo prazo. Isto reduz a diferença entre o tempo para a solução da rede elétrica (maior esforço computacional do esquema alternado) e o tempo para a solução das equações dos elementos do SEE, conforme pode ser visualizado na figura 6.33.

Observou-se, dos resultados obtidos, que os computadores IBM/SP1 e IBM/SP2 apresentam um ganho de desempenho para simulações de longa duração. Para ilustrar esta característica define-se um fator denominado *Razão de Proximidade do Tempo Real (RPTR)*.

Razão de Proximidade do Tempo Real (RPTR)

Este fator relaciona o tempo de CPU utilizado na simulação e o tempo de dinâmica simulado, representando a proximidade entre o tempo de CPU e o tempo de dinâmica simulada, ou seja, quantas vezes a simulação é mais lenta que o tempo real do sistema. A equação que define o *RPTR* é apresentada a seguir.

$$RPTR = \frac{\text{tempo de CPU}}{\text{tempo de dinamica simulada}} \quad (6.2)$$

A figura 6.34 apresenta o *RPTR* para o SEE *SSUD2000* para vários tempos de dinâmica simulados.

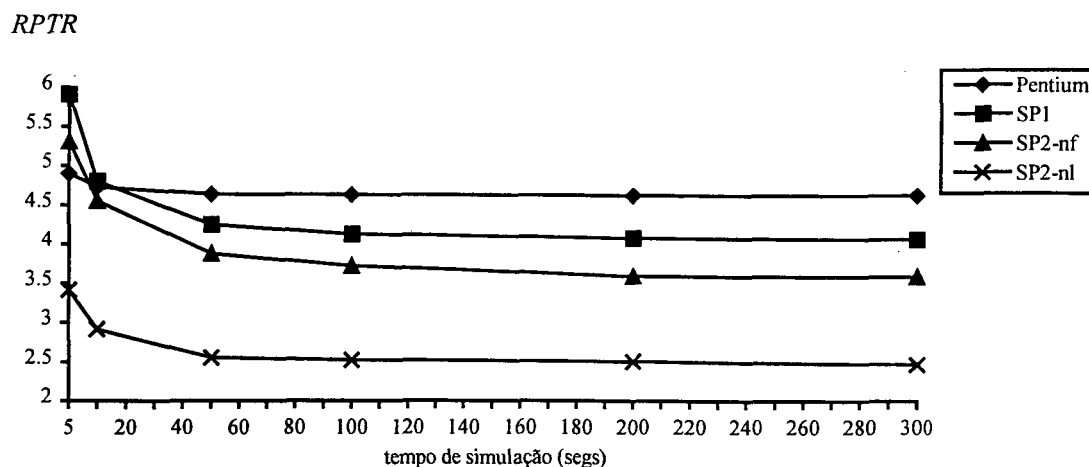


Figura 6.34 - Desempenho dos Computadores com o crescimento do tempo simulado

Da figura 6.34 observa-se que, para a plataforma INTEL (PENTIUM) o *RPTR* é cerca 4.8, permanecendo aproximadamente constante a medida que o tempo de dinâmica simulado aumenta. No entanto, para as demais plataformas o *RPTR* decresce para intervalos de simulação maiores. Para o IBM/SP1 o *RPTR* é de 5.9 para 5 segs. de simulação e cai para apenas 4.1

quando o tempo de simulação é de 300.0 segs.

6.3. Conclusões

Neste capítulo foram apresentados resultados relativos a aplicabilidade da Programação Orientada a Objetos a SEE. Estes resultados foram viabilizados através da implementação de um programa para simulação da dinâmica de SEE escrito em C++ usando a metodologia da POO.

Vários resultados foram apresentados ilustrando a capacidade e potencialidades do programa implementado para simulações de curto e longo prazo para um SEE teste. Assim o programa implementado foi utilizado para simular vários cenários e eventos no SEE teste, tais como curto circuitos, ilhamentos, instabilidade de tensão, etc. O programa apresentou bom desempenho em todas as situações simuladas.

Em uma segunda parte deste capítulo, foi avaliado o desempenho computacional do programa de simulação implementado. Esta avaliação envolveu diversos aspectos apresentando os seguintes resultados finais :

- As comparações de desempenho com um programa comercial escrito em FORTRAN para simulação do comportamento dinâmico de SEE (ANATEM) mostraram uma superioridade do programa orientado a objetos para simulação de SEE de pequeno porte. O programa ANATEM apresentou uma ligeira superioridade para SEE de médio e grande porte (não excedendo 20%). Estes resultados ocorrem para todas as plataformas computacionais testadas;
- A linguagem FORTRAN apresenta uma significativa superioridade no tratamento de variáveis complexas em relação ao C++. As operações complexas em C++ são cerca de duas vezes mais lenta quando comparadas com a mesma operação em FORTRAN. Este problema pode ser minimizado com a adoção de substituições do código correspondente a operações complexas nas partes do programa que as utilizam mais intensivamente;
- A utilização de opções de otimização na compilação dos programas reduz substancialmente o tempo total de processamento. O ganho de desempenho é de 1.26 a 1.6 para computadores da plataforma INTEL podendo chegar a 3.16 para um computador do tipo IBM/SP2 (*nó largo*);
- Para simulações de curto prazo obtém-se, com o programa implementado, tempo de CPU inferior ao tempo real do sistema em SEE de até 340 barras para todas as plataformas

computacionais testadas. Em máquinas do tipo IBM/SP2 (*nó largo*) obtém-se tempo de CPU menor que o tempo real do sistema para SEE de até 730 barras;

- Estes resultados repetem-se para simulações de longo prazo;
- O acréscimo de tempo proveniente da sofisticação da representação das unidades de geração e cargas utilizada nas simulações de longo prazo é de cerca de 17.8% para SEE de médio e grande porte, podendo chegar a 34% para SEE de pequeno porte.

Em vista dos resultados apresentados, mostra-se que a utilização da Programação Orientada a Objetos é perfeitamente viável para aplicações em SEE.

O programa implementado mostrou-se adequado para a utilização em simuladores para ensino e treinamento, podendo simular uma ampla faixa de eventos e situações nos SEE tanto para simulações de curto prazo quanto para simulações de longo prazo.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

O objetivo geral deste trabalho foi o desenvolvimento de um módulo computacional de simulação da dinâmica de SEE para simuladores de ensino e treinamento, usando a metodologia da programação orientada a objetos.

Para esta classe de simuladores, a modelagem matemática que representa os elementos do SEE deve ser cuidadosamente selecionada em função da grande diversidade de fenômenos que podem ocorrer no SEE, principalmente em simulações de longa duração. Neste trabalho foi realizada uma cuidadosa revisão bibliográfica da modelagem proposta na literatura para simuladores de curta e longa duração. Durante esta fase optou-se pela utilização de modelos detalhados para representar os elementos do SEE, em função da variedade mais ampla de fenômenos possíveis de serem simulados e da representação mais precisa para o comportamento do SEE. Embora alguns trabalhos na literatura proponham a utilização de modelos simplificados para representar os elementos do SEE. Os modelos selecionados para representação no módulo de simulação implementado são resumidamente descritos no capítulo 4, sendo apresentados com detalhes no apêndice A. A seleção e compilação desta modelagem constitui uma das contribuições deste trabalho.

Para o desenvolvimento do módulo de simulação foi utilizada a metodologia da programação orientada a objetos, juntamente com a linguagem C++, para as implementações compu-

tacionais. Esta técnica foi utilizada em função de suas facilidades para o desenvolvimento, manutenção, expansão e atualização de programas de médio e grande porte. A POO mostrou-se, ao longo das implementações computacionais, uma poderosa ferramenta para a simplificação da tarefa de programação. Assim, códigos extremamente legíveis e flexíveis foram implementados. Através da filosofia da POO foi desenvolvida uma estrutura computacional básica orientada a objetos para servir de suporte para as mais variadas aplicações em SEE. A estrutura computacional orientada a objetos desenvolvida é descrita em detalhes no capítulo 5 e constitui outra contribuição deste trabalho.

Também é contribuição deste trabalho a definição e implementação de uma estrutura matricial esparsa, orientada a objetos, para propósitos gerais. Assim, as mais diversas aplicações podem utilizar esta estrutura matricial com pouquíssimos ou sem nenhuma alteração do código já escrito. A manipulação da estrutura desenvolvida é realizada sem que o programador necessite conhecer detalhes específicos das implementações computacionais, adicionando praticidade e legibilidade ao desenvolvimento de novos programas.

Dentre os objetivos deste trabalho está a avaliação da viabilidade da POO para aplicações em SEE, considerando a facilidade de implementação, flexibilidade e desempenho computacional. No capítulo 6 deste trabalho foram realizados vários testes para validação e análise de desempenho do programa computacional implementado. Os testes efetuados foram classificados segundo duas categorias básicas :

- Resultados de Simulações de Curto e Longo Prazo e
- Resultados de Desempenho Computacional.

Resultados de Simulações de Curto e Longo Prazo : foram avaliados vários casos para ilustração da capacidade e potencialidades do programa implementado em realizar eficientemente simulações de curto e longo prazo. Para isto foi utilizado um SEE teste com 45 barras, representado em vários níveis de detalhamento.

Pode-se concluir sobre os resultados apresentados no capítulo 6 deste trabalho :

- O programa implementado é adequado para realizar tanto simulações de curto prazo como simulações de longo prazo, sendo muito eficiente computacionalmente para estas aplicações. De fato, em todas as simulações efetuadas nesta etapa o tempo de CPU necessário para a simulação foi muitas vezes inferior ao tempo de dinâmica simulada, caracterizando simulações em tempo real para aquele SEE.

- O programa mostrou-se robusto o suficiente para simular uma ampla faixa de fenômenos e eventos no SEE sem apresentar qualquer problema de convergência ou estabilidade numérica.

Resultados de Desempenho Computacional : nesta categoria de simulações procurou-se avaliar especificamente o desempenho do programa implementado para simulações de curto e longo prazo. Estes testes foram realizados em função da existência de registros na literatura relativos a perda da eficiência computacional associado ao uso da POO. Assim, foram realizados testes comparativos entre o programa orientado a objetos implementado e o programa ANATEM/CEPEL para SEE de várias dimensões. Os resultados encontrados foram :

- O desempenho computacional do programa ANATEM mostrou-se ligeiramente superior ao programa implementado em C++ para SEE de médio e grande porte. Em SEE de pequeno porte o programa orientado a objetos apresenta desempenho superior. Os resultados encontrados, no entanto, não constituem uma significativa diferença de desempenho. Assim ambos os programas são comparáveis em relação ao desempenho computacional.

Estes resultados mostram que é possível obter-se performance computacional com a utilização da POO. Esta característica aliada as já conhecidas facilidades quanto a implementação, manutenção e expansão dos programas colocam a POO como uma ferramenta bastante viável para as implementações computacionais em SEE.

No capítulo 6 também são apresentados resultados relativos ao desempenho do programa orientado a objetos para SEE de várias dimensões (pequeno, médio e grande porte), visando determinar a máxima dimensão possível para a obtenção de tempo de CPU inferior ao tempo de dinâmica simulada. Estes testes foram realizados em vários ambientes computacionais. Os resultados obtidos foram :

- Para microcomputadores da família INTEL/PENTIUM obteve-se tempo de CPU inferior ao tempo de dinâmica simulada para SEE de até 340 barras.
- Em computadores de grande porte obteve-se tempo de CPU inferior ao tempo de dinâmica simulada para SEE de até 730 barras em um computador IBM/SP2 (*nó largo*).

Estes resultados são válidos tanto para simulações de curto como para simulações de longo prazo. Salienta-se que nas simulações de longo prazo foi utilizada uma representação mais detalhada para as unidades de geração e cargas, ocasionando maiores tempos de CPU.

Estes resultados mostram que o programa implementado é adequado para compor o mó-

dulo de simulação dinâmica de um simulador para ensino e treinamento, conseguindo tempo de CPU inferior ao tempo de dinâmica simulada para SEE de pequeno e médio porte. Esta característica é fundamental para simuladores de ensino e treinamento em tempo real.

7.1. Sugestões para Futuros Trabalhos

As principais sugestões para futuros trabalhos são :

- Incluir e avaliar o efeito de variações na frequência do SEE para os modelos que não consideram esta hipótese (máquinas síncronas, linhas de transmissão, transformadores, etc).
- Incluir o sistema de proteção na modelagem orientada a objetos;
- Incluir o efeito da saturação magnética nos modelos de máquinas síncronas;
- Melhorar e determinar novas estratégias de redução do tempo de CPU para as simulações de longo prazo, tais como variação automática do passo de integração, chaveamento de modelos, etc.
- Introduzir o módulo implementado no ambiente de simulação proporcionado pelo simulador de SEE do LABSPOT.
- Avaliar a flexibilidade da estrutura computacional proposta para outras aplicações em SEE.

Bibliografia

- [1] M. R. V. VANTI, *Implementação Orientada para Objeto de um Simulador para Dinâmica Lenta de um Sistema de Energia Elétrica*, Tese de Mestrado, UFSC, Novembro de 1994.
- [2] B. HAKAVIK, A. T. HOLEN, "Power System Modelling and Sparse Matrix Operations Using Object-Oriented Programming", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994, pg. 1045-1051.
- [3] K. HEMMAPLARDH, J. W. MANKE, W. R. PAULY, J. W. LAMONT, "Considerations for a Long Term Dynamics Simulation Programs", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. PWRS-1, No. 1, February 1986, pg. 129-136.
- [4] J.L. JARDIM, X.V.FILHO, "Long Term Dynamics : Its Perspective in Brazil", *V Symposium of Specialist in Electric Operational and Expansion Planning*, SP-06, May de 96, Recife - PE - Brazil.
- [5] M. RAFIAN, M. STERLING, M. IRVING, "Real-Time Power System Simulation", *IEE Proceedings*, Vol. 134, Pt. C, No. 3, May 1987, pg. 206-223.
- [6] L. J. B. MACHADO, *O Simulador de Sistemas de Potência do LABSPOT*, Nota interna do Laboratório de Sistemas de Potência da UFSC, Abril 1991.
- [7] M. PRAIS, G. ZHANG, Y. CHEN, A. BOSE, D. CURTICE, "Operator Training Simulator : Algorithms and Test Results", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 3, August 1989, pg. 1154-1159.
- [8] M. PRAIS, C. JOHNSON, A. BOSE, D. CURTICE, "Operator Training Simulator : Component Models", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 3, August 1989, pg. 1160-1166.
- [9] R. PODMORE, J. C. GIRI, M. P. GORENBERG, J. P. BRITTON, N.M. PETERSON, "An Advanced Dispatcher Training Simulator", *IEEE Transactions on Power*

- Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 1, January 1982, pg. 17-25.
- [10] G. ZHANG, A. BOSE, "Scenario Building for Operator Training Simulators Using a Transient Stability Program", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 4, October 1989, pg. 1542-1549.
- [11] J. G. WAIGHT, K. NODEHI, M. RAFIAN, H. VON MEETEREN, A. BOSE, "An Advanced Transportable Operator Training Simulator", *IEEE Power Industry Computer Application Conference (17th PICA)*, No. 1992, May 1991, pg. 164-170.
- [12] R. J. FROWD, J. C. GIRI, R. PODMORE, "Transient Stability and Long-Term Dynamics Unified", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 10, October 1982, pg. 3841-3850.
- [13] P. BARATELLA, B. COVA, M. DAMONTE, E. GAGLIOTI, R. MARCONATO, P. SCARPELLINI, "Models and Special Techniques for Fast Simulation of Transient Stability and Long Term Dynamics in a General Purpose Power System Simulation", *IFAC Symposium on Control of Power Plants and Power Systems*, Cancún/México 1995, pg. 273-278.
- [14] P. BARATELLA, P. SCARPELLINI, R. MARCONATO, G. SALVADORI, B. COVA, M. DAMONTE, S. FERRARA, E. GAGLIOTI, R. ZACHEO, "New Improvements in Simulation Techniques and Graphic User Interface of the ENEL Power System Simulator Covering Different Time Scale Phenomena", *V Symposium of Specialist in Electric Operational and Expansion Planning*, IP-38, May de 96, Recife - PE - Brazil.
- [15] F. P. DE MELLO, J. W. FELTES, T. F. LASKOWSKI, L. J. OPPEL, "Simulating Fast and Slow Dynamic Effects in Power Systems", *IEEE Computer Applications in Power*, July 1992, pg. 33-38.
- [16] M. FOLEY, Y. CHEN, A. BOSE, "A Real Time Power System Simulation Laboratory Environment", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, November 1990, pg. 1400-1406.
- [17] R. F. CHU, E. J. DOBROWOLSKI, E. J. BARR, J. MCGEEHAN, D. SCHEURER, K. NODEHI, "The Uses of an Operator Training Simulator for System Restoration", *IEEE Power Industry Computer Application Conference (17th PICA)*, No. 1992,

- May 1991, pg. 171-177.
- [18] Y. SEKINE, K. TAKAHASHI, T. SAKAGUCHI, "Real-Time Simulation of Power System Dynamics", *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 16, No. 3, 1994, pg. 145-156.
 - [19] H. TAOKA, I. IYODA, H. NOGUCHI, N. SATO, T. NAKAZAWA, "Real-Time Digital Simulator for Power System Analysis on a Hypercube Computer", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, February 1992, pg. 1-10.
 - [20] S. KYUWA, T. YOSHIDA, S. YUASA, K. OMATA, K. MITAMURA, "Operator Training Simulator with Real-Time Transient Stability Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994, pg. 721-729.
 - [21] A. F. NEYER, F. F. WU, K. IMHOF, "Object-Oriented Programming for Flexible Software : Example of a Load Flow", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 3, August 1990, pg. 689-696.
 - [22] M. FOLEY, A. BOSE, W. MITCHELL, A. FAUSTINI, "An Object Based Graphical User Interface for Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, November 1993, pg. 97-104.
 - [23] E. Z. ZHOU, "Object-Oriented Programming, C++ and Power System Simulation", *IEEE/PES Winter Meeting*, paper 95 SW 219-5 PWRs, January/February 1995.
 - [24] A. J. MONTICELLI, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*, Edgard Blücher LTDA, 1983.
 - [25] L. J. B. MACHADO, A. J. A. SIMÕES COSTA, R. SALGADO, *Análise de Segurança em Sistemas de Potência*, Notas de Aula, UFSC, Florianópolis, SC, Versão 1994.
 - [26] B. VALIQUETTE, R. P. MALHAME, Y. GERVAIS, D. MUKHEDKAR, "Microcomputer Based Power Network Control Center Simulator for Education", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 2, May 1990, pg. 474-481.
 - [27] I. C. DECKER, *Algoritmos para Simulação da Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica em Computadores Paralelos*, Tese de Doutorado, UFRJ, 1993.
 - [28] K. SAIKAWA, M. GOTO, Y. IMAMURA, M. TAKATO, T. KANKE, "Real Time Simulation System of Large-Scale Power System Dynamics for a Dispatcher Training Simulator", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 12, December 1984, pg. 3496-3501.

- [29] B. STOTT, "Power System Dynamic Response Calculations", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 67, No. 2, February 1979, pg. 219-241.
- [30] C. P. ARNOLD, *Solutions of the Multi-Machine Power System Stability Problem*, PhD Thesis, University of Manchester, June 1976.
- [31] H. W. DOMMEL, N. SATO, "Fast Transient Stability Solutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-91, July/August 1972, pg. 1643-1650.
- [32] P. M. ANDERSON, B. DEMBART, "Computational Aspects of Transient Stability Analysis", *Electrical Power Systems Problems: The Mathematical Challenge, Proceedings of SIAM*, 1980, pg. 159-189.
- [35] M. M. ADIBI, P. M. HIRSCH, J. A. JORDAN, "Solution Methods for Transient and Dynamic Stability", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 62, No. 7, July 1974, pg. 951-958.
- [36] V. F. DA COSTA, *Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica*, Tese de Mestrado, UNICAMP, Dezembro de 1981.
- [37] A. P. FELTRIN, *Cálculo da Estabilidade Transitória em Sistemas de Energia Elétrica utilizando Esquema Simultâneo Implícito*, Tese de Mestrado, UNICAMP, Março de 1986.
- [38] J. ARRILLAGA, C. P. ARNOLD, B. J. HARKER, *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd, Great Britain, 1983.
- [39] J. W. MANKE, W. R. PAULY, K. HEMMAPLARDTH, "Long-Term System Dynamics Simulations Methods", EPRI Research Project RP-1469-1, Final Report, EL-3894, *Electric Power Research Institute*, USA, February 1985.
- [40] E. G. CATE, K. HEMMAPLARDH, J. W. MANKE, D. P. GELOPULOS, "Time Frame Notion and Time Response of the Models in Transient, Mid-Term and Long-Term Stability Programs", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 1, January 1984, pg. 143-151.
- [41] V. CONVERTI, D. P. GELOPULOS, M. HOUSLEY, G. STEINBRENNER, "Long-Term Stability Solution of Interconnected Power Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, No. 1, January/February 1976, pg. 96-104.

- [42] W. XU, Y. MANSOUR, "Voltage Stability Analysis using Generic Dynamic Load Models", *IEEE/PES 1993 Winter Meeting*, 93 WM 185-9 PWRS.
- [43] R. L. BURDEN, J. D. FAIRES, A. C. REYNOLDS, *Numerical Analysis*, Prindle Weber & Schmidt, USA, 1981.
- [44] T. KATO, K. IKEUCHI, "Variable Order and Variable Step-Size Integration Method for Transient Analysis Programs", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 1, February 1991, pg. 206-213.
- [45] J. Y. ASTIC, A. BIHAIN, M. JEROSOLIMSKI, "The Mixed Adams-BDF Variable Step Size Algorithm to Simulate Transient and Long Term Phenomena in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 2, May 1994, pg. 929-935.
- [46] N. JALEELI, L. S. VANSLYCK, D. N. EWART, L. H. FINK and A. G. HOFFMANN, "Understanding Automatic Generation Control", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 3, August 1992, pg. 1106-1122.
- [47] IEEE Power System Engineering Committee, "A Description of Discrete Supplementary Controls for Stability", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-97, No. 1, January/February 1978, pg. 149-165.
- [48] F. P. DE MELLO, R. J. MILLS, W. F. B'RELLS, "Automatic Generation Control. Part I / Process Modeling", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, March/April 1973, pg. 710-715.
- [49] P. M. ANDERSON, A. A. FOUAD, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, USA, 1977.
- [50] ANATEM - *Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário*, V01-04/94, CEPEL/Eletróbrás, Abril de 1994.
- [51] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, No. 6, June 1968, pg. 1460-1464.
- [52] IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981, pg. 494-509.

- [53] A.S. E SILVA, A.J.A. SIMÕES, *Aspectos Dinâmicos do Controle de Sistemas de Potência*, Notas de Aula, UFSC.
- [54] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, No. 6, November/December 1973, pg. 1904-1915.
- [55] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, "Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for System Dynamics Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 7, No. 1, February 1992, pg. 167-179.
- [56] Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, "Dynamic Models for Fossil Fueled Steam Units in Power System Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 2, May 1991, pg. 753-761.
- [57] E. DE JAEGER, N. JANSSENS, B. MALFLIET, F. VAN DE MEULEBROEKE, "Hydro Turbine Model for System Dynamics", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, November 1994, pg. 1709-1715.
- [58] IEEE Working Group on Power Plant Response to Load Changes, "MW Response of Fossil Fueled Steam Units", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, No. 2, Mar/Apr 1973, pg. 455-463.
- [59] L. N. HANNETT, "Combustion Turbine Dynamic Model Validation from Tests", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 1, February 1993, pg. 152-158.
- [60] L. N. HANNETT, B. FARDANESH, "Field Tests to Validate Hydro Turbine-Governor Model Structure and Parameters", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, November 1994, pg. 1744-1751.
- [61] M. J. MCARTHUR, "Developments in Control Techniques for Large Gas Turbines", *Journal of Science & Technology*, Vol. 39, No. 1, 1972, pg. 34-42.
- [62] V. KOLA, A. BOSE, P. M. ANDERSON, "Power Plant Models for Operator Training Simulators", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 4, No. 2, May 1989, pg. 559-565.
- [63] F. P. DE MELLO, "Boiler Models for System Dynamic Performance Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 6, No. 1, February 1991, pg. 66-74.

- [64] M. H. DWARAKANATH, B. DEMBART, A. M. ERISMAN, "A Generalized Methodology for Modeling System Components in Power System Dynamics Simulation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 1, January 1982, pg. 136-146.
- [65] T. INOUE, T. ICHIKAWA, P. KUNDUR, P. HIRSCH, "Nuclear Plant Models for Medium- to Long-term Power System Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, February 1995, pg. 141-147.
- [66] T. ICHIKAWA, T. INOUE, "Light Water Reactor Plant Modeling for Power System Dynamics Simulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, May 1988, pg. 463-471.
- [67] M. A. DI LASCIO, R. MORET, M. POLOUJADOFF, "Reduction of Program Size for Long-Term Power System Simulation with Pressurized Water Reactor", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 3, March 1983, pg. 745-751.
- [68] R. L. PACHECO, *Simulação da Operação de Usinas Nucleoelétricas em um Modelo Estocástico de Produção de Energia*, Tese de Mestrado, UFSC, Abril de 1983.
- [69] G. W. STAGG, A. H. EL-ABIAD, *Computação Aplicada a Sistemas de Geração e Transmissão de Potência*, Guanabara Dois, 1979.
- [70] M. S. CALOVIC, "Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984, pg. 1909-1914.
- [71] C. W. TAYLOR, *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill Inc., USA, 1994.
- [72] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, February 1995, pg. 523-538.
- [73] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Load Representation for Dynamic Performance Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 8, No. 2, May 1993, pg. 472-482.
- [74] D. KARISSEN, D. J. HILL, "Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1,

February 1994, pg. 157-166.

- [75] D. S. BRERETON, D. G. LEWIS, C. C. YOUNG, "Representation of Induction-Motor Loads During Power System Stability Studies", *AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-76, August 1957, pg. 451-461.
- [76] P. C. KRAUSE, C. H. THOMAS, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-84, No. 11, November 1965, pg. 1038-1053.
- [77] E. BOMPARD, E. CARPANETO, G. CHICCO, R. NAPOLI, "Asynchronous Motor Models for Voltage Stability Analysis", *Proceedings Int. Seminar*, Switzerland, August 1994.
- [78] A. LERM, "Modelos de Carga para Estudos de Estabilidade de Tensão", *Relatório Interno do Laboratório de Sistemas de Potência da UFSC*, Novembro de 1994.
- [79] T. L. SKVARENINA, P. C. KRAUSE, "Accuracy of a Reduced Order Model of Induction Machines in Dynamic Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No. 4, July/August 1979, pg. 1192-1197.
- [80] IEEE Special Stability Controls Working Group, "Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 1, February 1994, pg. 229-240.
- [81] F. P. DE MELLO, R. J. MILLS, W. F. B'RELLS, "Automatic Generation Control. Part II / Digital Control Techniques", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, March/April 1973, pg. 716-724.
- [82] C. W. TAYLOR, R. L. CRESAP, "Real-Time Power System Simulation for Automatic Generation Control", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-95, No. 1, January/February 1976, pg. 375-384.
- [83] H. SCHILD, *Turbo C++, Guia do Usuário*, McGraw-Hill Inc, 1992.
- [84] M. FOLEY, A. BOSE, "Object-Oriented on-line Network Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 1, February 1995.
- [86] TRANSDIR - *Programa TRANSDIR, Manual do Usuário*, Versão 4.01, Eletrobrás, Outubro de 1991.
- [85] J. L. L. AZEVEDO, *Um Estudo da Simulação da Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica usando Computadores Paralelos de Alto Desempenho*, Dissertação de

Mestrado, Março de 1996.

[87] N. COHN, *Control of Interconnected Power System*, John Wiley, 1971.

APÊNDICE A

MODELAGEM DOS ELEMENTOS DO SEE PARA SIMULAÇÃO

Neste apêndice são apresentados os detalhes relativos a modelagem descrita no capítulo 4 deste trabalho. A maioria dos modelos esta na forma de diagramas de blocos, sendo estes apresentados juntamente com o conjunto de equações diferenciais e algébricas que descrevem o comportamento dinâmico do modelo. Algumas particularidades são discutidas.

A descrição da modelagem dos elementos do SEE esta dividida da seguinte maneira :

- **Unidades de Geração** : compreende a representação de todos os elementos de uma unidade de geração. Assim, são apresentados modelos para as máquinas síncronas, reguladores de tensão, reguladores de velocidade, turbinas e sistema de geração de vapor;
- **Rede Elétrica** : apresenta os modelos mais comuns para os elementos da rede elétrica de um SEE. Tais como linhas de transmissão, transformadores com tap fixo e transformadores com tap variável.
- **Cargas** : compreende a representação dos modelos usualmente utilizados para representar as cargas em simulações de curta e longa duração. Apresentam-se modelos para cargas estáticas polinomiais, motores de indução, modelos agregados dinâmicos de carga e um modelo para curva de carga.

- **FACTS** : são apresentados dois modelos para dispositivos FATC. Um modelo para os Compensadores Estáticos de Reativos e outro para os Capacitores Série Controlados,
- **Controle Automático da Geração** : apresenta um modelo derivado das referências [81,82] para representar os esquemas de CAG em estudos dinâmicos de SEE.

A seguir descreve-se os elementos representados neste trabalho.

A.1. Unidades de Geração

Em SEE uma unidade de geração é basicamente constituída pela máquina síncrona, sistemas de controle, turbina e pelo sistema de geração de vapor quando a unidade for térmica. A figura A.1 ilustra com maior nível de detalhes os elementos que compõem a unidade de geração, e a conexão desta à rede elétrica do SEE.

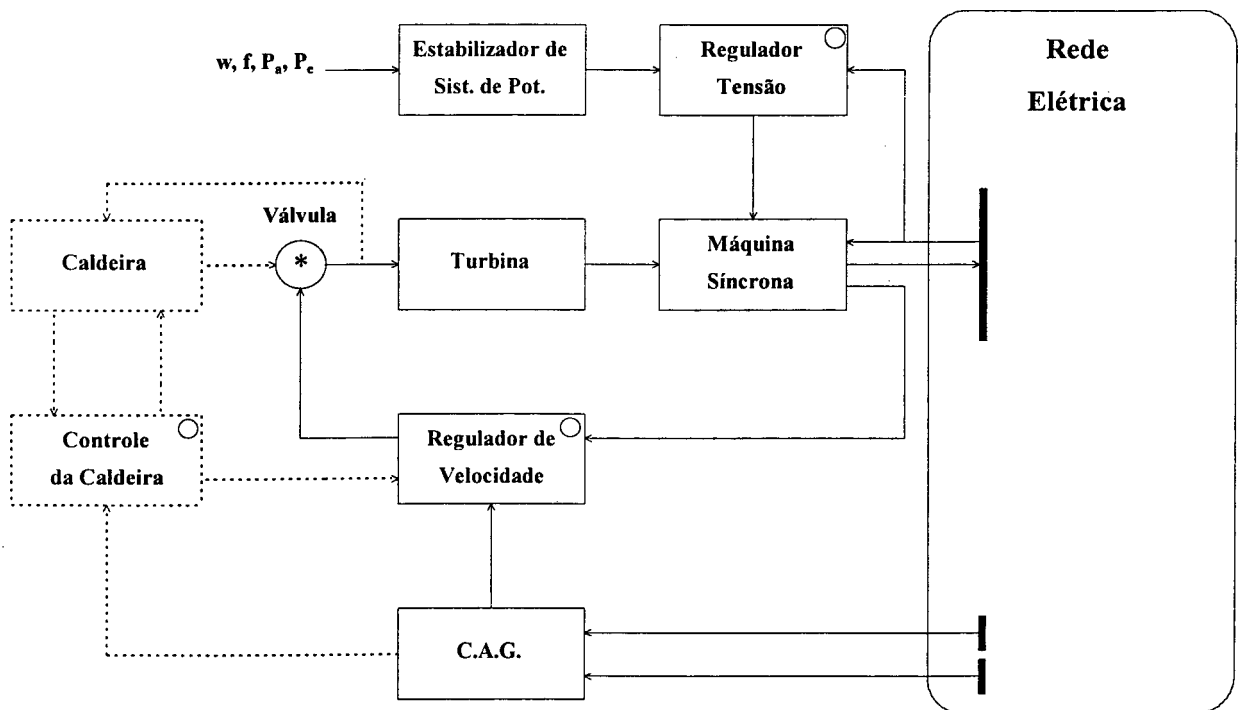


Figura A.1 - Diagrama funcional de uma Unidade de Geração

Os elementos desenhados em linha tracejada existem somente para unidades de geração termelétricas, sendo eliminados em hidroelétricas.

A maioria dos modelos selecionados para representar os elementos da unidade de geração adaptam-se tanto para simulações de curto prazo como para simulações de longo prazo, permitindo assim a observação de ambos os fenômenos. A seguir descrevem-se os modelos se-

leccionados para representar os elementos do diagrama da figura A.1.

A.1.1. Máquinas Síncronas

Os modelos matemáticos normalmente utilizados para representar as máquinas síncronas em estudos de estabilidade transitória encontram-se muito bem estabelecidos [27,30,38,49]. Estes modelos são derivados do modelo geral de Park para máquinas síncronas, assumindo-se as seguintes hipóteses simplificadoras [27] :

- desprezam-se os efeitos das variações de velocidade dos rotores das máquinas síncronas sobre as tensões de seus estatores, sob a hipótese que o desvio de velocidade em relação a velocidade síncrona é normalmente pequeno ($w \approx 1.0$ pu);
- os termos de tensões variacionais $\dot{\lambda}_d$ e $\dot{\lambda}_q$, nas equações de tensões do estator são desprezados;
- representa-se somente a componente de frequência fundamental das correntes e tensões nos estatores das máquinas síncronas, permitindo assim o uso de fasores;

As hipóteses simplificadoras descritas acima conduzem à definição de um conjunto de equações diferenciais ordinárias para descrever o comportamento dinâmico dos rotores das máquinas síncronas, constituído de um subconjunto de equações eletromecânicas e um subconjunto de equações elétricas [27,38,49]. Os enrolamentos estatóricos das máquinas síncronas podem ter suas constantes de tempo desprezadas, sendo então representados por um conjunto de equações algébricas.

A.1.1.1. Sistemas de Referência

As transformações de Park para o modelo geral da máquina síncrona baseiam-se na adoção de um sistema de coordenadas que gira na mesma velocidade do rotor da máquina, definindo um eixo em fase com os pólos do rotor (eixo direto - d) e outro 90° elétricos atrasado em relação ao primeiro (eixo quadratura - q). A principal vantagem deste sistema de referência é que os coeficientes das equações desenvolvidas não são dependentes do tempo [27,30,38,49].

A utilização de um sistema de coordenadas para cada máquina síncrona dificulta a transformação de grandezas das máquinas para a rede elétrica, tornando necessário a adoção de um sistema padrão de referência para a rede elétrica. A escolha mais adequada é um sistema de referência (*re-im*) que gira na velocidade síncrona [38,49]. A figura A.2 ilustra a representação de

uma grandeza qualquer (X) nos dois sistemas de coordenadas, onde δ é a defasagem angular entre os dois sistemas.

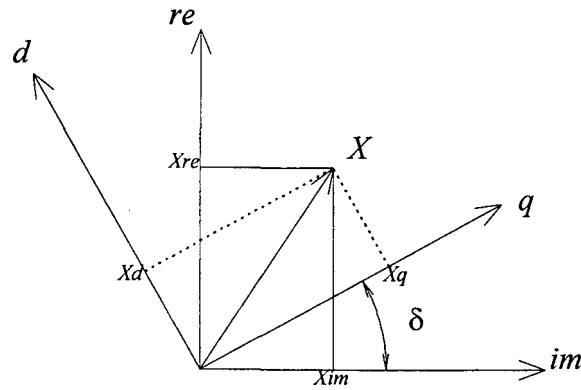


Figura A.2 - Eixos de referência $d-q$ e $re-im$

A transformação entre os dois sistemas de coordenadas é realizada pela aplicação do operador ortogonal T , definido abaixo :

$$T = T^{-1} = \begin{bmatrix} -\sin \delta & \cos \delta \\ \cos \delta & \sin \delta \end{bmatrix} \quad (A.1)$$

Aplicando o operador T à grandeza X da figura A.2, teremos :

$$\begin{bmatrix} X_{re} \\ X_{im} \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} X_{re} \\ X_{im} \end{bmatrix} \quad (A.2)$$

A defasagem angular entre os dois eixos de referência (δ) e a velocidade do rotor da máquina síncrona são descritas pelas equações diferenciais eletromecânicas da máquina.

A.1.1.2. Modelos de Máquinas Síncronas para Estudos Dinâmicos

Os modelos para máquinas síncronas normalmente utilizados em estudos dinâmicos são classificados em 5 tipos [27,38], considerando-se para isso suas características construtivas (pólos lisos ou pólos salientes) e o tipo de efeitos que se deseja representar no modelo (transitório e/ou subtransitório).

• Modelo I - Clássico :

O Modelo I é o mais simples utilizado para representar máquinas síncronas. Este modelo é formulado a partir das seguintes hipóteses adicionais :

* o enlace de fluxo do enrolamento de campo é considerado constante durante o transitório ($E'_q = cte$) e

* os enrolamentos amortecedores e a saliência transitória são desprezados.

Sob estas hipóteses, o comportamento dinâmico do rotor é descrito apenas pelo conjunto de equações eletromecânicas abaixo.

$$\dot{w} = \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot [P_m - P_e - D \cdot (w - w_r)] \quad (A.3)$$

$$\dot{\delta} = w - w_r \quad (A.4)$$

As equações algébricas para o estator são :

$$\begin{aligned} -V_d &= r \cdot I_d + x'_d \cdot I_q \\ E'_q - V_q &= r \cdot I_q - x'_d \cdot I_d \end{aligned} \quad (A.5)$$

A potência elétrica assume a forma :

$$P_e = E'_q \cdot I_q - r \cdot |\bar{I}|^2 \quad (A.6)$$

O modelo desenvolvido é válido apenas para estudos da ordem do período da primeira oscilação, sendo inadequado para estudos de longa duração, onde necessita-se de uma representação mais detalhada para a máquina síncrona [27,38].

• Modelo II - Máquina Síncrona de Pólos Salientes (Efeitos Transitórios):

O Modelo II é indicado para representar máquinas síncronas de pólos salientes quando não são considerados os efeitos subtransitórios devido aos enrolamentos amortecedores. Este é o modelo mais simples que considera os efeitos transitórios para o campo, tornando-o adequado para uma faixa mais ampla de estudos que o Modelo I.

O comportamento dinâmico do rotor é descrito então pelo conjunto de equações eletromecânicas e por uma equação elétrica para a tensão transitória no eixo q (E'_q). Estas equações são apresentadas abaixo :

$$\dot{w} = \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot [P_m - P_e - D \cdot (w - w_r)] \quad (A.7)$$

$$\dot{\delta} = w - w_r \quad (A.8)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} \cdot [E_{fd} + (x_d - x'_d) \cdot I_d - E'_q] \quad (A.9)$$

As equações algébricas do estator são :

$$\begin{aligned} -V_d &= r \cdot I_d + x'_q \cdot I_q \\ E'_q - V_q &= r \cdot I_q - x'_d \cdot I_d \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

A potência elétrica assume a forma :

$$P_e = E'_q \cdot I_q - (x'_q - x'_d) \cdot I_d \cdot I_q - r \cdot |\vec{I}|^2 \quad (\text{A.11})$$

• **Modelo III - Máquina Síncrona de Pólos Lisos (Efeitos Transitórios) :**

O Modelo III é adequado para representar máquinas de pólos lisos quando não são considerados os efeitos subtransitórios devido aos enrolamentos amortecedores. Este modelo considera os efeitos transitórios para o campo.

O comportamento dinâmico do rotor é descrito pelo conjunto de equações eletromecânicas e por duas equações elétricas para tensão transitória (E'_q e E'_d). Estas equações são apresentadas abaixo :

$$\dot{w} = \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot [P_m - P_e - D \cdot (w - w_r)] \quad (\text{A.12})$$

$$\dot{\delta} = w - w_r \quad (\text{A.13})$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} \cdot [E_{fd} + (x_d - x'_d) \cdot I_d - E'_q] \quad (\text{A.14})$$

$$\dot{E}'_d = \frac{1}{T'_{qo}} \cdot [-(x_q - x'_q) \cdot I_q - E'_d] \quad (\text{A.15})$$

As equações algébricas do estator são :

$$\begin{aligned} E'_d - V_d &= r \cdot I_d + x'_q \cdot I_q \\ E'_q - V_q &= r \cdot I_q - x'_d \cdot I_d \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

A potência elétrica para este modelo assume a forma :

$$P_e = E'_d \cdot I_d + E'_q \cdot I_q - (x'_q - x'_d) \cdot I_d \cdot I_q - r \cdot |\vec{I}|^2 \quad (\text{A.17})$$

• **Modelo IV - Máquina Síncrona de Pólos Salientes (Efeitos Subtransitórios) :**

O modelo IV é adequado para representar máquinas síncronas de pólos salientes, onde os efeitos subtransitórios dos enrolamentos amortecedores são considerados.

O comportamento dinâmico do rotor é descrito então pelo conjunto de equações eletromecânicas, uma equação elétrica para tensão transitória (E'_q) e por duas equações elétricas para

tensão subtransitória (E''_q e E''_d). Estas equações são apresentadas abaixo :

$$\dot{w} = \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot [P_m - P_e - D \cdot (w - w_r)] \quad (A.18)$$

$$\dot{\delta} = w - w_r \quad (A.19)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} \cdot [E_{fd} + (x_d - x'_d) \cdot I_d - E'_q] \quad (A.20)$$

$$\dot{E}''_q = \frac{1}{T''_{do}} \cdot [E'_q + (x'_d - x''_d) \cdot I_d - E''_q] \quad (A.21)$$

$$\dot{E}''_d = \frac{1}{T''_{qo}} \cdot [E'_d - (x'_q - x''_q) \cdot I_q - E''_d] \quad (A.22)$$

As equações algébricas do estator são :

$$E''_d - V_d = r \cdot I_d + x''_q \cdot I_q \quad (A.23)$$

$$E''_q - V_q = r \cdot I_q - x''_d \cdot I_d$$

A potência elétrica para este modelo assume a forma :

$$P_e = E''_d \cdot I_d + E''_q \cdot I_q - (x''_q - x''_d) \cdot I_d \cdot I_q - r \cdot |\vec{I}|^2 \quad (A.24)$$

• **Modelo V - Máquina Síncrona de Pólos Lisos (Efeitos Subtransitórios) :**

O modelo V é adequado para representar máquinas síncronas de pólos lisos, onde os efeitos subtransitórios dos enrolamentos amortecedores são considerados.

O comportamento dinâmico do rotor é descrito pelo conjunto de equações eletromecânicas, duas equações para tensão transitória (E'_q e E'_d) e duas equações para tensão subtransitória (E''_q e E''_d). As equações são apresentadas abaixo :

$$\dot{w} = \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot [P_m - P_e - D \cdot (w - w_r)] \quad (A.25)$$

$$\dot{\delta} = w - w_r \quad (A.26)$$

$$\dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} \cdot [E_{fd} + (x_d - x'_d) \cdot I_d - E'_q] \quad (A.27)$$

$$\dot{E}'_d = \frac{1}{T'_{qo}} \cdot [-(x_q - x'_q) \cdot I_q - E'_d] \quad (A.28)$$

$$\dot{E}_q'' = \frac{1}{T_{do}''} \cdot [E_q' + (x_d' - x_d'') \cdot I_d - E_q''] \quad (\text{A.29})$$

$$\dot{E}_d'' = \frac{1}{T_{do}''} \cdot [E_d' - (x_q' - x_q'') \cdot I_q - E_d''] \quad (\text{A.30})$$

As equações algébricas do estator são :

$$\begin{aligned} E_d'' - V_d &= r \cdot I_d + x_q'' \cdot I_q \\ E_q'' - V_q &= r \cdot I_q - x_d'' \cdot I_d \end{aligned} \quad (\text{A.31})$$

A potência elétrica para este modelo assume a forma :

$$P_e = E_d'' \cdot I_d + E_q'' \cdot I_q - (x_q'' - x_d'') \cdot I_d \cdot I_q - r \cdot |\vec{I}|^2 \quad (\text{A.32})$$

• Modelo Não-Convencional [5]

Os modelos de máquinas síncronas desenvolvidos especificamente para simuladores de longo prazo adicionam novas considerações àquelas utilizadas para os modelos apresentados anteriormente. Um novo modelo pode então ser formulado com base nas seguintes hipóteses adicionais [1]:

- * os efeitos transitórios são desprezados ($x_d' = x_d$ e $x_q' = x_q$);
- * os efeitos subtransitórios são desprezados;
- * a indução de corrente no núcleo rotórico não é considerada, reduzindo a representação do rotor a um circuito de campo no eixo d .

Sob estas considerações, o comportamento dinâmico do rotor é descrito pelo conjunto de equações eletromecânicas e por uma equação elétrica para o campo, apresentadas abaixo.

$$\dot{w} = \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot [P_m - P_e - D \cdot (w - w_r)] \quad (\text{A.33})$$

$$\dot{\delta} = w - w_r \quad (\text{A.34})$$

$$\dot{E} = \frac{1}{T_{do}'} \cdot (E_{fd} - E) \quad (\text{A.35})$$

As equações algébricas do estator assumem a seguinte forma :

$$\begin{aligned} -V_d &= r \cdot I_d + x_q \cdot I_q \\ E - V_q &= r \cdot I_q - x_d \cdot I_d \end{aligned} \quad (\text{A.36})$$

A potência elétrica para este modelo é :

$$P_e = E \cdot I_q + (x_d - x_q) \cdot I_d \cdot I_q - r \cdot |\vec{I}|^2 \quad (\text{A.37})$$

O modelo desenvolvido é indicado somente para a representação de máquinas síncronas em estudos a longo prazo, quando os fenômenos rápidos podem ser completamente desconsiderados.

A.1.1.3. Conexão da Máquina Síncrona com a Rede Elétrica :

As equações apresentadas neste trabalho para representar as máquinas síncronas estão definidas na forma de equivalentes Thevenin (tensões atrás de reatâncias). Para a conexão com a rede elétrica é mais conveniente transformar esta representação em uma injeção de corrente em paralelo com uma admitância, na forma de um equivalente Norton. Desta forma o efeito do comportamento da máquina síncrona na rede elétrica pode ser representado por uma injeção de corrente na barra (I_{eq}) [27,38] e por uma admitância em derivação (Y_{eq}), conforme ilustra a figura abaixo.

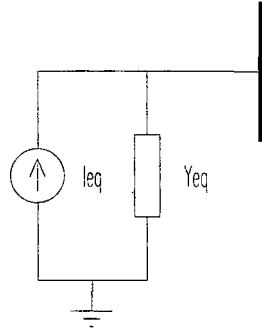


Figura A.9 - Equivalente Norton para os Estatores das Máquinas Síncronas

O equivalente Norton pode ser obtido aplicando-se o operador para a transformação de coordenadas (T) ao conjunto de equações algébricas do estator da máquina síncrona. Para os modelos II e III, descritos anteriormente, a obtenção do equivalente Norton é desenvolvida a seguir [27].

As equações algébricas do estator na forma matricial ficam :

$$\begin{bmatrix} E'_d - V_d \\ E'_q - V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & x'_q \\ -x'_d & r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.38})$$

Aplicando o operador T a ambos lados da equação teremos :

$$T \cdot \begin{bmatrix} E'_d - V_d \\ E'_q - V_q \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} r & x'_q \\ -x'_d & r \end{bmatrix} \cdot T \cdot T^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.39})$$

Desenvolvendo a expressão acima e explicitando a injeção de corrente na forma complexa, obtém-se :

$$\bar{I} = \frac{r - j \cdot \frac{1}{2} \cdot (x'_q + x'_d)}{r^2 + x'_d \cdot x'_q} \cdot (\bar{E}' - \bar{V}) - j \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot (x'_q - x'_d)}{r^2 + x'_d \cdot x'_q} \cdot (\bar{E}'^* - \bar{V}^*) \cdot e^{j2\delta} \quad (\text{A.40})$$

Esta expressão representa a injeção de corrente complexa da máquina síncrona na rede elétrica do SEE. A equação acima define convenientemente uma parcela que depende exclusivamente da tensão \bar{V} . A admitância associada a esta parcela pode então ser adicionada a admitância própria da barra melhorando o condicionamento do sistema de equações que descreve a rede elétrica [27].

Um processo similar pode ser feito aos demais modelos apresentados anteriormente, resultando em nas equações :

* Modelos de máquinas síncronas considerando os efeitos subtransitórios :

$$\bar{I} = \frac{r - j \cdot \frac{1}{2} \cdot (x''_q + x''_d)}{r^2 + x''_d \cdot x''_q} \cdot (\bar{E}'' - \bar{V}) - j \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot (x''_q - x''_d)}{r^2 + x''_d \cdot x''_q} \cdot (\bar{E}''^* - \bar{V}^*) \cdot e^{j2\delta} \quad (\text{A.41})$$

* Modelo Não-Convencional de máquina síncrona :

$$\bar{I} = \frac{r - j \cdot \frac{1}{2} \cdot (x_q + x_d)}{r^2 + x_d \cdot x_q} \cdot (\bar{E} - \bar{V}) - j \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot (x_q - x_d)}{r^2 + x_d \cdot x_q} \cdot (\bar{E}^* - \bar{V}^*) \cdot e^{j2\delta} \quad (\text{A.42})$$

A.1.2. Regulador de Tensão

Atualmente existe uma grande diversidade de tipos de reguladores de tensão que são utilizados pelas empresas de energia elétrica. Isto conduz a utilização de uma vasta quantidade de modelos para representar os diferentes sistemas de excitação [50]. Nas referências [51,52] foi proposta uma padronização de nomenclatura e representação para os principais tipos de reguladores de tensão. Nestes trabalhos foram definidos alguns modelos gerais que são adequados para representar a maioria dos reguladores de tensão atualmente em uso.

A seguir são apresentados dois modelos, selecionados da padronização realizada pelo IEEE [51,52], que são utilizados para representar reguladores de tensão. Também são apresentados dois modelos simplificados, um de uso geral e outro para utilização específica em estudos

de longo prazo. Todos os modelos apresentados possuem entrada para um sinal adicional qualquer (V_{sgn}), normalmente utilizado para a conexão do Estabilizador de Sistemas de Potência.

A.1.2.1. Modelo IEEE Tipo 1 [51]

O modelo IEEE Tipo 1 é adequado para representar os reguladores de tensão que possuem excitatrizes rotativas CC como fonte de tensão para o sistema de excitação. O diagrama de blocos da figura A.3 ilustra o modelo que representa o regulador.

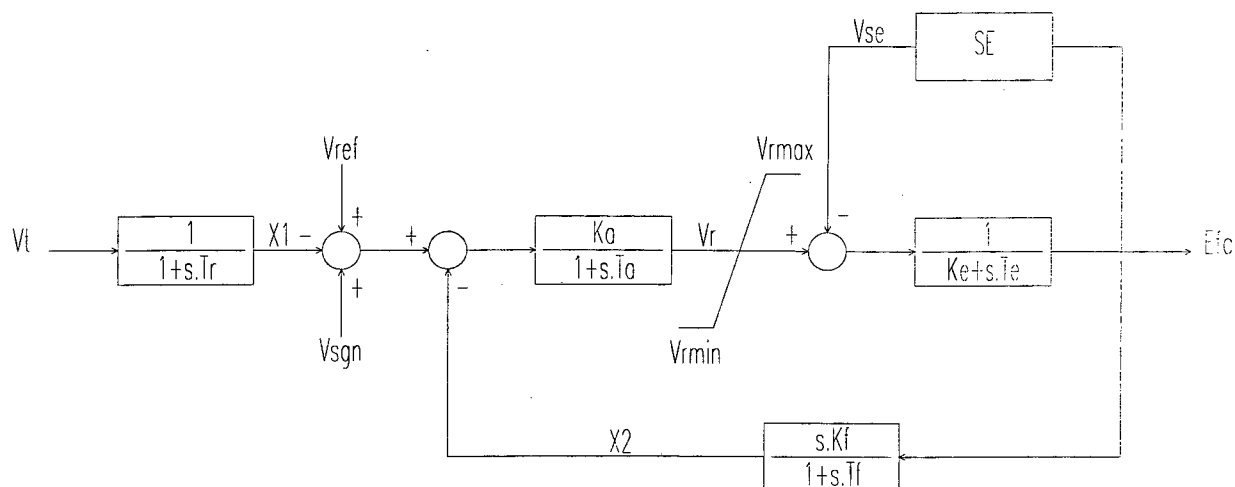


Figura A.3 - Sistema de excitação IEEE Tipo 1

Os elementos principais da malha direta do modelo são : o filtro de entrada representado pela função de transferência $1/(1+s \cdot T_r)$, a função de transferência que representa o amplificador $K_a/(1+s \cdot T_a)$, e a função de transferência que representa a excitatriz $1/(K_e+s \cdot T_e)$. O limitador impede que o sinal de saída do amplificador exceda limites práticos de operação do equipamento. Este modelo apresenta ainda uma malha de realimentação para estabilização, caracterizada por uma função de transferência derivativa do tipo $s \cdot K_f/(1+s \cdot T_f)$.

As equações que definem o comportamento dinâmico são :

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_r} \cdot V_t - \frac{1}{T_r} \cdot X_1 \quad (A.43)$$

$$\dot{V}_r = \frac{K_a}{T_a} \cdot (V_{ref} + V_{sgn} - X_1 - X_2) - \frac{1}{T_a} \cdot V_r \quad (A.44)$$

$$V_r = \begin{cases} V_{rmax} & \Rightarrow V_r > V_{rmax} \\ V_{rmin} & \Rightarrow V_r < V_{rmin} \end{cases} \quad (A.45)$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} \cdot (V_r - V_{SE}) - \frac{K_e}{T_e} \cdot E_{fd} \quad (A.46)$$

$$X_2 = \frac{K_f}{T_f} \cdot E_{fd} - X'_2 \quad (A.47)$$

$$\dot{X}'_2 = \frac{K_f}{T_f} \cdot E_{fd} - X'_2 \quad (A.48)$$

Para evitar que o sinal de entrada na função de transferência da malha de estabilização seja derivado, usualmente, separa-se a equação diferencial em duas partes (eqs. A.47 e A.48), conforme proposto em [38].

• **Saturação da Excitatriz :**

O modelo apresentado na figura A.3 possui um bloco denominado *SE*, que representa a saturação magnética da excitatriz do regulador [51]. A equação que descreve o efeito da saturação no modelo do regulador de tensão é da seguinte forma :

$$V_{SE} = SE \cdot E_{fd} \quad (A.49)$$

onde o termo *SE* normalmente é definido como uma função não-linear de E_{fd} , ou

$$SE = f(E_{fd}) \quad (A.50)$$

A função que representa a saturação da excitatriz pode apresentar diferentes formas, uma vez que a definição da função f é particular à cada programa de simulação. A referência [51] sugere, por motivos de padronização, que a função f seja definida pelos pontos :

$$\begin{aligned} SE_{max} & - E_{fd_{max}} \\ SE_{0.75} & - 0.75 * E_{fd_{max}} \end{aligned}$$

onde SE_{max} corresponde a saturação para a máxima tensão de campo ($E_{fd_{max}}$) e $SE_{0.75}$ corresponde a saturação para 75% da máxima tensão de campo do regulador de tensão.

Para simplificação da representação, a referência [38] propõe que a curva que representa a saturação seja aproximada por duas retas, conforme ilustra a figura A.4. A equação que representa o efeito da saturação assume então a seguinte forma [38] :

$$V_{SE} = (K_1 \cdot E_{fd} + K_2) \cdot E_{fd} \quad (A.51)$$

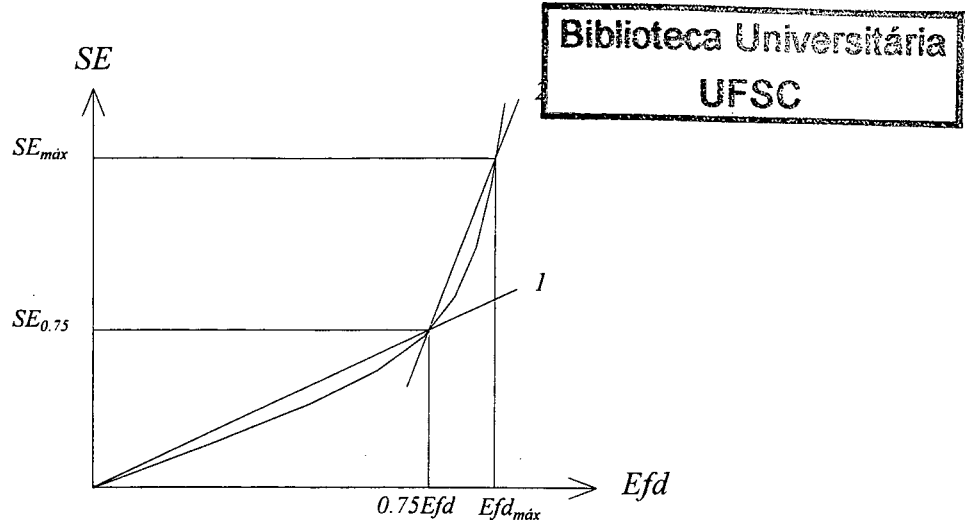


Figura A.4 - Saturação da Excitatriz

A seleção da reta em uso, bem como o cálculo dos coeficientes K_1 e K_2 é feito conforme as relações abaixo :

* Se $Efd \leq 0.75 \cdot Efd_{max} \Rightarrow$ Reta 1, e

$$\begin{aligned} K_1 &= (4 \cdot SE_{0.75}) / (3 \cdot Efd_{max}) \\ K_2 &= 0 \end{aligned} \quad (A.52)$$

* Se $Efd > 0.75 \cdot Efd_{max} \Rightarrow$ Reta 2, e

$$\begin{aligned} K_1 &= 4 \cdot (SE_{max} - SE_{0.75}) / Efd_{max} \\ K_2 &= 4 \cdot SE_{0.75} - 3 \cdot SE_{max} \end{aligned} \quad (A.53)$$

O regulador IEEE Tipo 1 requer então dois parâmetros adicionais para considerar a saturação da excitatriz. Estes parâmetros são SE_{max} e $SE_{0.75}$. O valor de Efd_{max} pode ser facilmente determinado utilizando a equação A.54, definida abaixo [38,51].

$$V_{r_{max}} = (SE_{max} + K_e) \cdot Efd_{max} \quad (A.54)$$

A determinação de $0.75 \cdot Efd_{max}$ torna-se então trivial.

A.1.2.2. Modelo IEEE ST-1

O modelo IEEE ST-1 é adequado para representar os reguladores de tensão que possuem retificadores estáticos tiristorizados como fonte de tensão para o sistema de excitação [52]. A alimentação do retificador é fornecida pela própria tensão terminal da máquina síncrona, ou de serviços auxiliares. A figura A.5 apresenta o diagrama de blocos deste modelo.

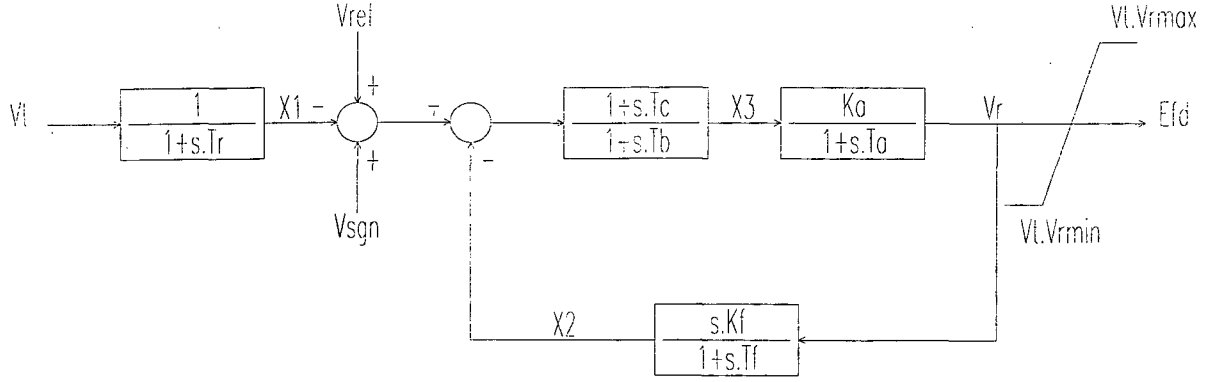


Figura A.5 - Sistema de excitação IEEE ST-1

O modelo IEEE ST-1 representa somente elementos estáticos. Por este motivo suas constantes de tempo são muito baixas, tornando a ação do regulador bastante rápida. O limitador no modelo considera os limites práticos do regulador (V_{rmax} e V_{rmin}) e a tensão de alimentação (V_t) tomada na barra terminal do gerador. Isto reduz a faixa de atuação do regulador quando a tensão de alimentação é reduzida, devido, por exemplo, a um curto-circuito próximo à barra terminal do gerador.

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_r} \cdot V_t - \frac{1}{T_r} \cdot X_1 \quad (A.55)$$

$$X_3 = \frac{T_c}{T_b} \cdot (V_{ref} + V_{sgn} - X_1 - X_2) + X'_3 \quad (A.56)$$

$$\dot{X}'_3 = \left(\frac{1}{T_b} - \frac{T_c}{T_b^2} \right) \cdot (V_{ref} + V_{sgn} - X_1 - X_2) - \frac{1}{T_b} \cdot X'_3 \quad (A.57)$$

$$\dot{V}_r = \frac{K_a}{T_a} \cdot X_3 - \frac{1}{T_a} \cdot V_r \quad (A.58)$$

$$E_{fd} = \begin{cases} V_t \cdot V_{rmax} \Rightarrow V_r > V_t \cdot V_{rmax} \\ V_r \Rightarrow V_t \cdot V_{rmin} < V_r < V_t \cdot V_{rmax} \\ V_t \cdot V_{rmin} \Rightarrow V_r < V_t \cdot V_{rmin} \end{cases} \quad (A.59)$$

$$X_2 = \frac{K_f}{T_f} \cdot V_r - X'_2 \quad (A.60)$$

$$\dot{X}'_2 = \frac{K_f}{T_f^2} \cdot V_r - \frac{1}{T_f} \cdot X'_2 \quad (A.61)$$

Para evitar que os sinais de entrada na função de transferência da malha de estabilização e no “lead-lag” sejam derivados, usualmente separam-se as equações diferenciais que descrevem estes blocos em duas partes (eqs. A.56 e A.57 para o “lead-lag” e eqs. A.60 e A.61 para a função de transferência da malha de estabilização) [38]. Esta prática será adotada para todos “lead-lags” e funções de transferência derivativas dos modelos subsequentes.

A.1.2.3. Modelos Simplificados

Os modelos de regulador de tensão podem ser substancialmente simplificados, sendo representados apenas por uma função de transferência de primeira ordem e pelo limitador, para evitar que o regulador não exceda limites práticos de operação. Estas simplificações conduzem ao desenvolvimento dos modelos apresentados a seguir.

A.1.2.3.1. Modelo Simplificado 1 :

Neste modelo é mantida a característica dinâmica do regulador de tensão, representada pela função de transferência $1/(1+s.T_a)$. O diagrama de blocos que o descreve é ilustrado pela figura A.6.

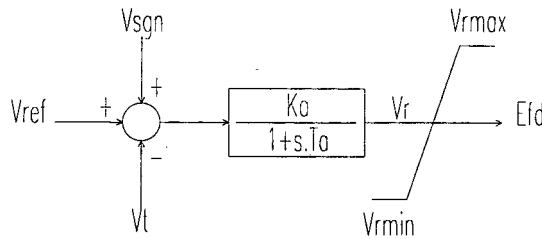


Figura A.6 - Sistema de excitação simplificado

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{V}_r = \frac{K_a}{T_a} \cdot (V_{ref} + V_{sgn} - V_t) - \frac{1}{T_a} \cdot V_r \quad (A.62)$$

$$E_{fd} = \begin{cases} V_{rmax} & \Rightarrow V_r > V_{rmax} \\ V_r & \Rightarrow V_{rmin} < V_r < V_{rmax} \\ V_{rmin} & \Rightarrow V_r < V_{rmin} \end{cases} \quad (A.63)$$

O modelo simplificado 1 pode ser utilizado para representar reguladores de tensão que possuem somente elementos estáticos.

A.1.2.3.2. Modelo Simplificado 2 [5] :

O modelo simplificado 2, proposto em [5], desconsidera a dinâmica do regulador de tensão, sendo definido apenas pelo ganho K_a . Este modelo é representado por equações algébricas somente. O diagrama de blocos que o escreve é apresentado na figura A.7.

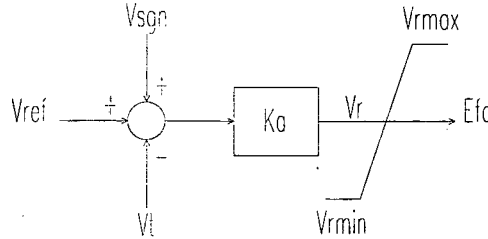


Figura A.7 - Sistema de excitação simplificado

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$V_r = K_a \cdot (V_{ref} + V_{sgn} - V_t) \quad (A.64)$$

$$E_{fd} = \begin{cases} V_{rmax} \Rightarrow V_r > V_{rmax} \\ V_r \Rightarrow V_{rmin} < V_r < V_{rmax} \\ V_{rmin} \Rightarrow V_r < V_{rmin} \end{cases} \quad (A.65)$$

Este modelo deve ser utilizado preferencialmente quando estudos de longo prazo do SEE são o principal interesse, onde então a dinâmica do regulador pode ser desconsiderada [5]

A.1.3. Estabilizador de Sistemas de Potência - ESP

Os estabilizadores de sistemas de potência utilizam um sinal adicional, geralmente, derivado da máquina síncrona para fornecer amortecimento às oscilações eletromecânicas do sistema. A natureza deste sinal determina a estrutura do ESP que será utilizado. Por este motivo, apresenta-se a seguir dois modelos gerais que são adequados para representar a maioria dos ESPs atualmente em uso [53]. Os modelos apresentados diferem conforme o tipo de sinal adicional utilizado.

A.1.3.1. ESP Derivado da Potência Elétrica ou Acelerante :

Este ESP é adequada para processar sinais adicionais de potência elétrica ou de potência acelerante das máquinas síncronas. O diagrama de blocos que descreve o modelo é apresentado

a seguir.

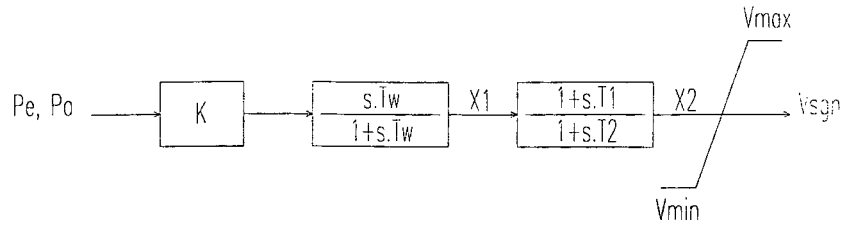


Figura A.8 - ESP derivado da Potência Elétrica ou Acelerante

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$X_1 = K \cdot P_{ae} - X'_1 \quad (A.66)$$

$$\dot{X}'_1 = \frac{K}{T_w} \cdot P_{ae} - \frac{1}{T_w} \cdot X'_1 \quad (A.67)$$

$$X_2 = \frac{T_1}{T_2} \cdot X_1 + X'_2 \quad (A.68)$$

$$\dot{X}'_2 = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2^2} \right) \cdot X_1 - \frac{1}{T_2} \cdot X'_2 \quad (A.69)$$

$$V_{sgn} = \begin{cases} V_{max} \Rightarrow X_2 > V_{max} \\ X_2 \Rightarrow V_{min} < X_2 < V_{max} \\ V_{min} \Rightarrow X_2 < V_{min} \end{cases} \quad (A.70)$$

A.1.3.2. ESP Derivado da Velocidade ou Frequência :

Este ESP é adequada para processar sinais adicionais de velocidade da máquina síncrona ou frequência das barras. O diagrama de blocos que descreve o modelo é apresentado a seguir.

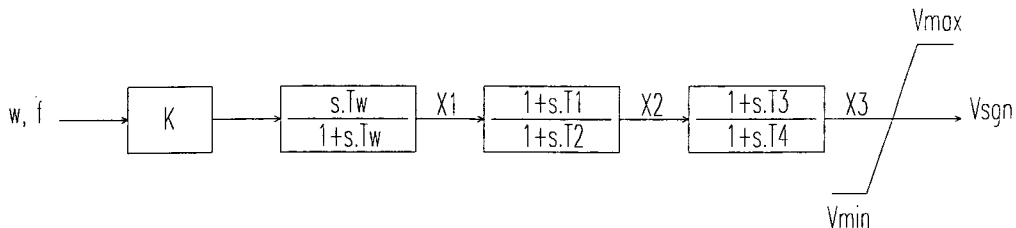


Figura A.9 - ESP derivado da Velocidade ou Frequência

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$X_1 = K \cdot wf - X'_1 \quad (A.71)$$

$$\dot{X}'_1 = \frac{K}{T_w} \cdot wf - \frac{1}{T_w} \cdot X'_1 \quad (A.72)$$

$$X_2 = \frac{T_1}{T_2} \cdot X_1 + X'_2 \quad (A.73)$$

$$\dot{X}'_2 = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2^2} \right) \cdot X_1 - \frac{1}{T_2} \cdot X'_2 \quad (A.74)$$

$$X_3 = \frac{T_3}{T_4} \cdot X_2 + X'_3 \quad (A.75)$$

$$\dot{X}'_3 = \left(\frac{1}{T_4} - \frac{T_3}{T_4^2} \right) \cdot X_2 - \frac{1}{T_4} \cdot X'_3 \quad (A.76)$$

$$V_{\text{sgn}} = \begin{cases} V_{\text{max}} \Rightarrow X_3 > V_{\text{max}} \\ X_3 \Rightarrow V_{\text{min}} < X_3 < V_{\text{max}} \\ V_{\text{min}} \Rightarrow X_3 < V_{\text{min}} \end{cases} \quad (A.77)$$

O efeito dos estabilizadores de sistemas de potência é mais destacado durante o período transitório do SEE, razão pela qual freqüentemente são desconsiderados em simulações de longo prazo.

A.1.4. Regulador de Velocidade

Os reguladores de velocidade possuem efeito mais destacado em estudos de longa duração. Por esta razão simuladores para este tipo de estudo devem possuir modelos suficientemente detalhados para representar estes elementos. Os modelos propostos para representar reguladores de velocidade [38,54,55,56] são basicamente compostos por : um sensor de velocidade, um mecanismo de amplificação e controle, que pode ser mecânico ou elétrico, e um servomotor hidráulico utilizado para controlar a posição da válvula. O tipo de mecanismo dos elementos de amplificação/controle e do servomotor definem o controle do regulador (controle mecânico-hidráulico ou controle elétrico-hidráulico).

A seguir são apresentados vários modelos, selecionados das referências [54,55], para representar os reguladores de velocidade. Será dada maior ênfase aos reguladores de velocidade para unidades de geração hidráulica, uma vez que este tipo de unidade é a predominante no sis-

tema elétrico brasileiro.

A.1.4.1. Regulador de Velocidade para Turbinas Térmicas [54] :

Existem diversos tipos de reguladores de velocidade para turbinas térmicas (controle mecânico-hidráulico, controle elétrico-hidráulico sem realimentação de fluxo de vapor, controle elétrico-hidráulico com realimentação de fluxo de vapor, etc). Entretanto em [54] é proposto um modelo geral de regulador de velocidade que é adequado para representar a maioria dos reguladores utilizados em unidades de geração térmica. Este modelo é apresentado na figura A.10.

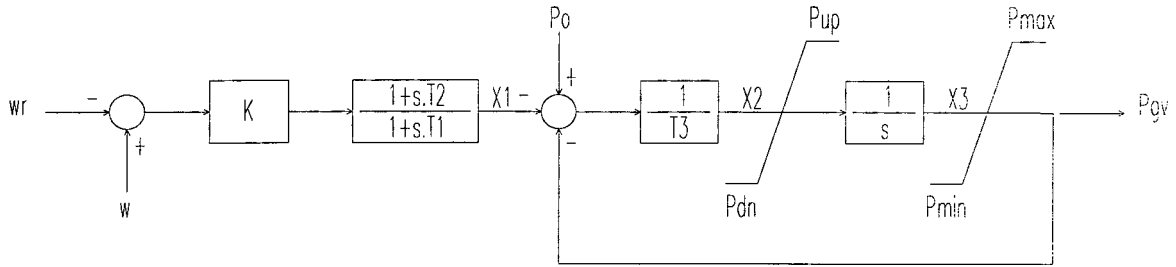


Figura A.10 - Regulador de Velocidade Geral para Unidades Térmicas

Uma adequada sintonia nos parâmetros K , T_1 e T_2 define o tipo de controle do regulador, mecânico-hidráulico ou elétrico-hidráulico [54]. Os limitadores especificam limites para a velocidade de atuação do servomotor e posição da válvula. Ambos os limites devem ser devidamente ajustados para a potência mecânica. A entrada P_o do regulador define a referência de carga da unidade de geração. Esta referência é alterada por controle local ou pelo Controle Automático de Geração.

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$X_1 = \frac{T_2}{T_1} \cdot K \cdot (w - w_r) + X'_1 \quad (A.78)$$

$$\dot{X}'_1 = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{T_2}{T_1^2} \right) \cdot K \cdot (w - w_r) - \frac{1}{T_1} \cdot X'_1 \quad (A.79)$$

$$X_2 = \frac{1}{T_3} \cdot (P_o - X_1 - P_{gv}) \quad (A.80)$$

$$X_2 = \begin{cases} P_{up} \Rightarrow X_2 > P_{mup} \\ P_{dn} \Rightarrow X_2 < P_{dn} \end{cases} \quad (A.81)$$

$$\dot{X}_3 = X_2 \quad (A.82)$$

$$P_{gv} = \begin{cases} P_{max} \Rightarrow X_3 > P_{max} \\ X_3 \Rightarrow P_{min} < X_3 < P_{max} \\ P_{min} \Rightarrow X_3 < P_{min} \end{cases} \quad (A.83)$$

A.1.4.2. Regulador de Velocidade para Turbinas Hidráulicas [54,55] :

Os reguladores para turbinas hidráulicas possuem um comportamento dinâmico diferente conforme o tipo do mecanismo de controle (controle mecânico-hidráulico ou elétrico-hidráulico), o que justifica a adoção de um modelo próprio. A seguir é descrito um modelo geral [54] e os modelos específicos para cada tipo de regulador [55].

A.1.4.2.1. Modelo Geral :

O modelo geral deriva de simplificações no modelo do regulador de velocidade com controle mecânico-hidráulico. Entretanto este modelo pode ser adaptado para representar o comportamento de um regulador de velocidade com controle elétrico-hidráulico. Para isto deve-se ajustar os parâmetros do modelo a fim de que este tenha comportamento semelhante ao regulador com controle elétrico-hidráulico. Este modelo é adequado para simulações de curta duração, em que deseja-se representar o sistema de regulação de velocidade [54]. A figura A.11 ilustra o modelo.

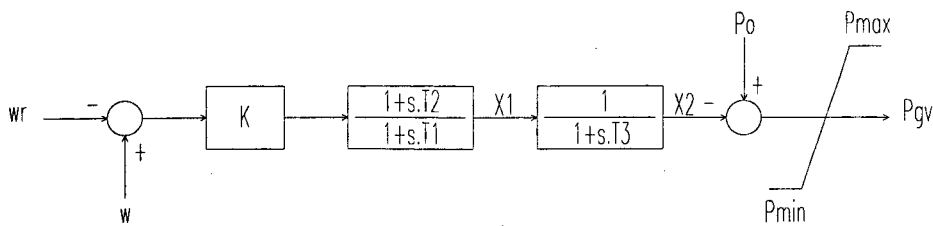


Figura A.11 - Regulador de Velocidade Geral para Unidades Hidráulicas

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$X_1 = \frac{T_2}{T_1} \cdot K \cdot (w - w_r) + X_1' \quad (A.84)$$

$$\dot{X}_1' = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{T_2}{T_1^2} \right) \cdot K \cdot (w - w_r) - \frac{1}{T_1} \cdot X_1' \quad (A.85)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_3} \cdot X_1 - \frac{1}{T_3} \cdot X_2 \quad (A.86)$$

$$P_{gv} = \begin{cases} P_{max} \Rightarrow P_o - X_2 > P_{max} \\ P_o - X_2 \Rightarrow P_{min} < P_o - X_2 < P_{max} \\ P_{min} \Rightarrow P_o - X_2 < P_{min} \end{cases} \quad (A.87)$$

A.1.4.2.2. Modelo com Controle Mecânico-Hidráulico :

Em simulações de longa duração o modelo geral não representa adequadamente o comportamento do regulador para turbinas hidráulicas. Para estas simulações torna-se necessário a adoção de um modelo mais detalhado [55]. O modelo apresentado na figura A.12 representa detalhadamente o regulador de velocidade com controle mecânico-hidráulico [55].

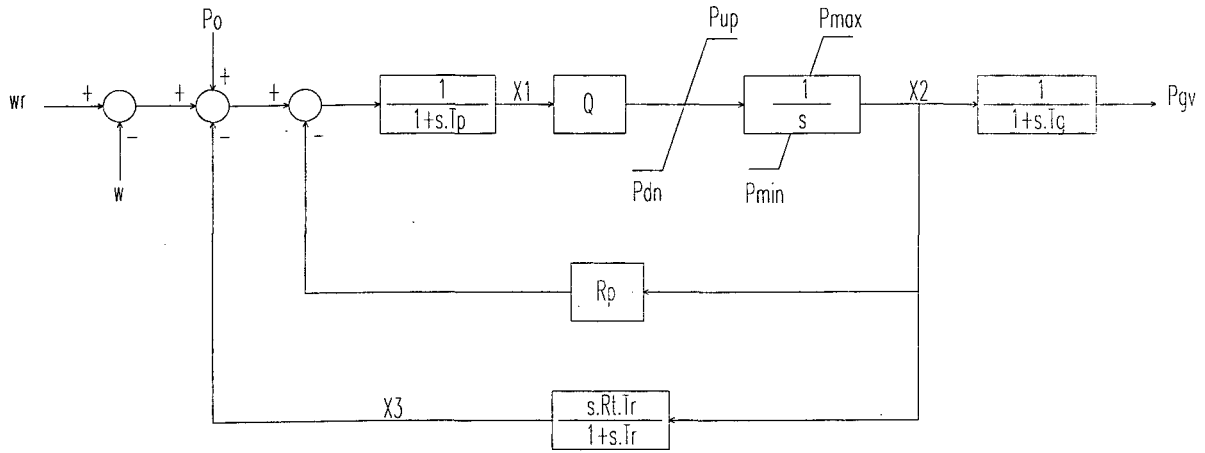


Figura A.12 - Regulador de Velocidade para Unidades Hidráulicas

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_p} \cdot (w_r - w - X_3 - R_p \cdot X_2 + P_o) - \frac{1}{T_p} \cdot X_1 \quad (A.88)$$

$$Q \cdot X_1 = \begin{cases} P_{up} \Rightarrow Q \cdot X_1 > P_{mup} \\ P_{dn} \Rightarrow Q \cdot X_1 < P_{dn} \end{cases} \quad (A.89)$$

$$\dot{X}_2 = Q \cdot X_1 \quad (A.90)$$

$$X_2 = \begin{cases} P_{max} \Rightarrow X_2 > P_{max} \\ P_{min} \Rightarrow X_2 < P_{min} \end{cases} \quad (A.91)$$

$$\dot{P}_{gv} = \frac{1}{T_g} \cdot X_2 - \frac{1}{T_g} \cdot P_{gv} \quad (A.92)$$

$$X_3 = \frac{R_l \cdot T_r}{T_r} \cdot X_2 - X'_3 \quad (A.93)$$

$$\dot{X}'_3 = \frac{R_l \cdot T_r}{T_r^2} \cdot X_2 - \frac{1}{T_r} \cdot X'_3 \quad (A.94)$$

A.1.4.2.3. Modelo com Controle Elétrico-Hidráulico :

O modelo apresentado na figura A.13 é utilizado para representar reguladores de velocidade com controle elétrico-hidráulico [55]. O mecanismo de controle elétrico-hidráulico garante maior flexibilidade ao regulador. Isto ocorre devido ao uso de circuitos eletrônicos ao invés de componentes mecânicos. A figura A.13 ilustra o diagrama de blocos deste regulador.

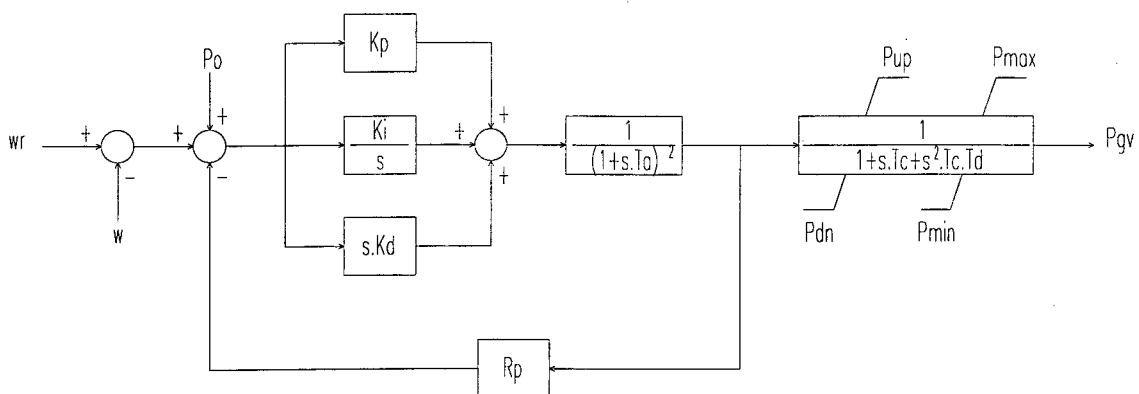


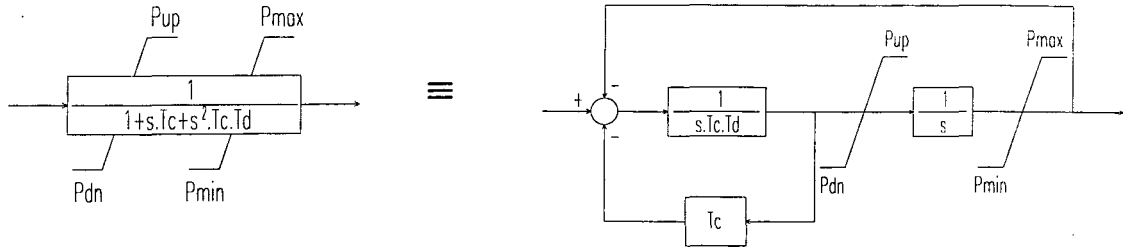
Figura A.13 - Regulador de Velocidade para Unidades Hidráulicas

As equações que descrevem o modelo da figura A.13 não podem ser diretamente escritas a partir deste diagrama. Algumas transformações devem ser feitas nos elementos do diagrama :

- * a função de transferência que representa o derivador no controle *PID* deve ser substituída por uma função do tipo $s \cdot K_D / (1 + s \cdot T)$, uma vez que aquela função não é fisicamente realizável. O valor da constante de tempo T deve então ser ajustado para filtrar as altas frequências, indesejáveis em um bloco derivador;

- * o primeiro bloco de segunda ordem do diagrama $1/(1 + s \cdot T_a)^2$ deve ser dividido em dois blocos de primeira ordem do tipo $1/(1 + s \cdot T_a)$;

- * o bloco de segunda ordem que representa o servomotor deve ser reescrito de maneira que todas as funções de transferência que o representam sejam de primeira ordem. Desta forma a equivalência abaixo pode ser aplicada ao modelo :



A adoção das equivalências descritas acima conduz ao desenvolvimento do diagrama de blocos da figura A.14 para representar o modelo de regulador com controle elétrico-hidráulico.

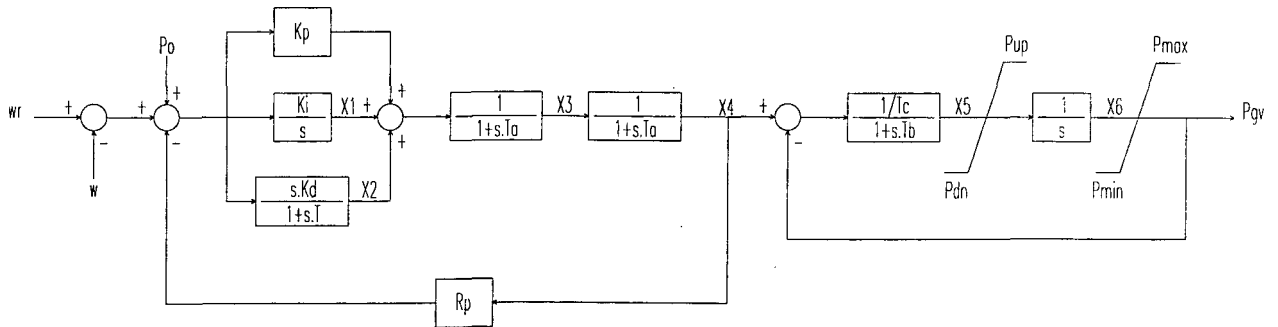


Figura A.14 - Regulador de Velocidade para Unidades Hidráulicas

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{X}_1 = K_I \cdot (w_r - w - R_p \cdot X_4 + P_o) \quad (\text{A.95})$$

$$X_2 = \frac{K_D}{T} \cdot (w_r - w - R_p \cdot X_4 + P_o) - X_2' \quad (\text{A.96})$$

$$\dot{X}_2' = \frac{K_D}{T^2} \cdot (w_r - w - R_p \cdot X_4 + P_o) - \frac{1}{T} \cdot X_2' \quad (\text{A.97})$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_a} \cdot [X_1 + X_2 + K_p \cdot (w_r - w - R_p \cdot X_4 + P_o)] - \frac{1}{T_a} \cdot X_3 \quad (\text{A.98})$$

$$\dot{X}_4 = \frac{1}{T_a} \cdot X_3 - \frac{1}{T_a} \cdot X_4 \quad (\text{A.99})$$

$$\dot{X}_5 = \frac{1/T_c}{T_b} \cdot (X_4 - P_{gv}) - \frac{1}{T_b} \cdot X_5 \quad (\text{A.100})$$

$$X_5 = \begin{cases} P_{up} \Rightarrow X_5 > P_{up} \\ P_{dn} \Rightarrow X_5 < P_{dn} \end{cases} \quad (\text{A.101})$$

$$\dot{X}_6 = X_5 \quad (\text{A.102})$$

$$P_{gv} = \begin{cases} P_{max} \Rightarrow X_6 > P_{max} \\ X_6 \Rightarrow P_{min} < X_6 < P_{max} \\ P_{min} \Rightarrow X_6 < P_{min} \end{cases} \quad (A.103)$$

A.1.4.3. Regulador de Velocidade Simplificado [39] :

Para unidades de geração em que os parâmetros do regulador de velocidade são desconhecidos pode ser utilizado um modelo de regulador muito simples. Neste modelo o único parâmetro necessário é a característica de regulação da unidade de geração (R), conforme é apresentado no diagrama de blocos da figura A.15.

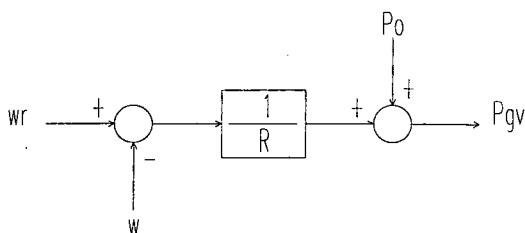


Figura A.15 - Regulador de Velocidade Simplificado

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$P_{gv} = P_o + \frac{1}{R} \cdot (w_r - w) \quad (A.104)$$

O modelo simplificado é particularmente adequado para unidades de geração com turbinas a gás [39].

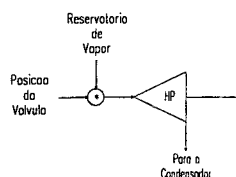
A.1.5. Turbinas

As turbinas são os elementos que convertem energia térmica ou hidráulica na potência mecânica que será entregue às máquinas síncronas. Os efeitos do comportamento dinâmico das turbinas é mais destacado em simulações de longa duração, quando são significativos para o balanço Carga-Geração do SEE. Por esta razão, os simuladores de longo prazo necessitam de uma modelagem detalhada para estes elementos.

A seguir são apresentados os modelos mais utilizados para representar o comportamento dinâmico das turbinas. Tais modelos foram selecionados das referências [38,39,50,54,55,56,57, 58,59] e classificados de acordo com o tipo de unidade de geração (térmica, hidráulica ou gás).

A.1.5.1. Turbinas Térmicas [38,54,56,58] :

As turbinas térmicas convertem a energia do vapor superaquecido em potência mecânica. Em geral as turbinas térmicas são compostas por diferentes estágios em função do nível de pressão do vapor (alta - HP, média - IP e baixa pressão - LP). O número e a disposição dos estágios da turbina definem várias configurações possíveis. As configurações mais comuns são ilustradas pelas figuras A.16, A.17, A.18, A.19, A.20 e A.21 [38,54] :



$$P_{gv} \rightarrow \frac{1}{1+s.T_{ch}} \rightarrow P_t$$

Figura A.16 - Sem Reaquecimento (#1)

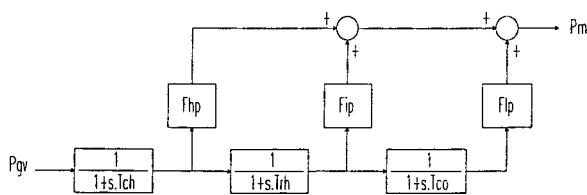
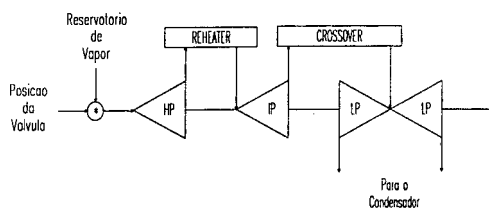


Figura A.17 - “Tandem compound”, simples reaquecimento (#2)

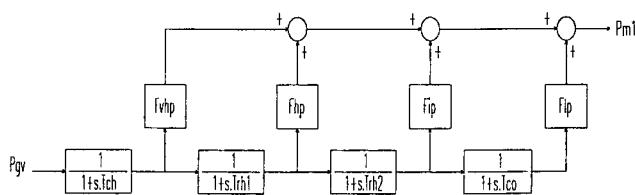
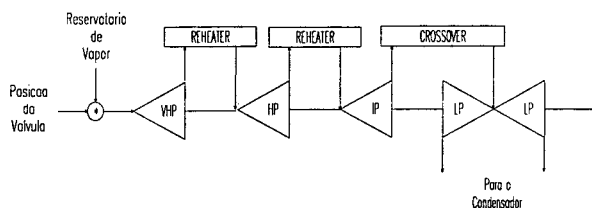


Figura A.18 - “Tandem compound”, duplo reaquecimento (#3)

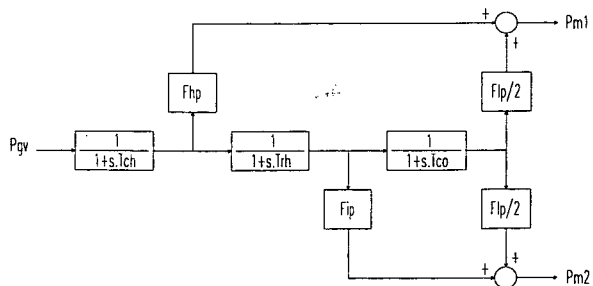
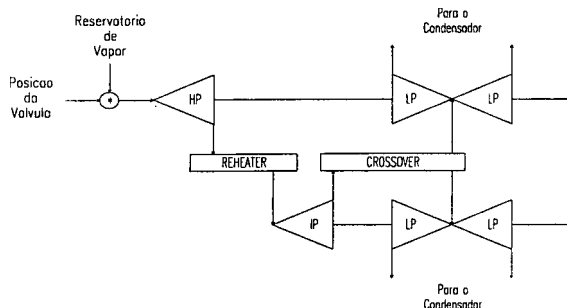


Figura A.19 - “Cross compound”, simples reaquecimento (#4)

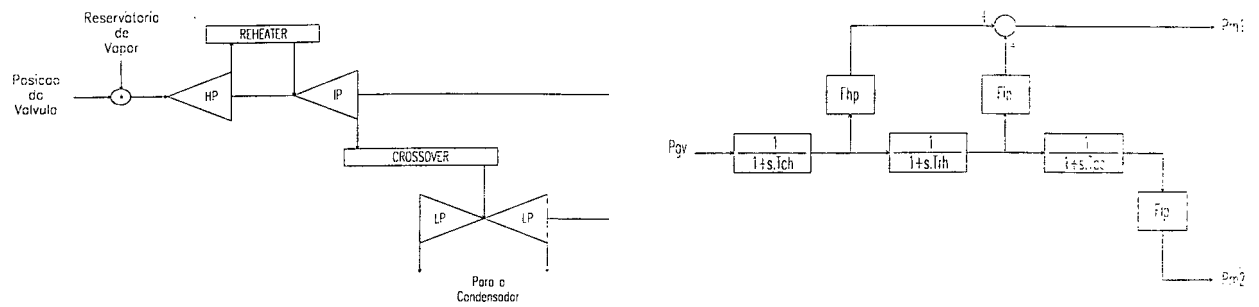


Figura A.20 - “Cross compound”, simples reaquecimento (#5)

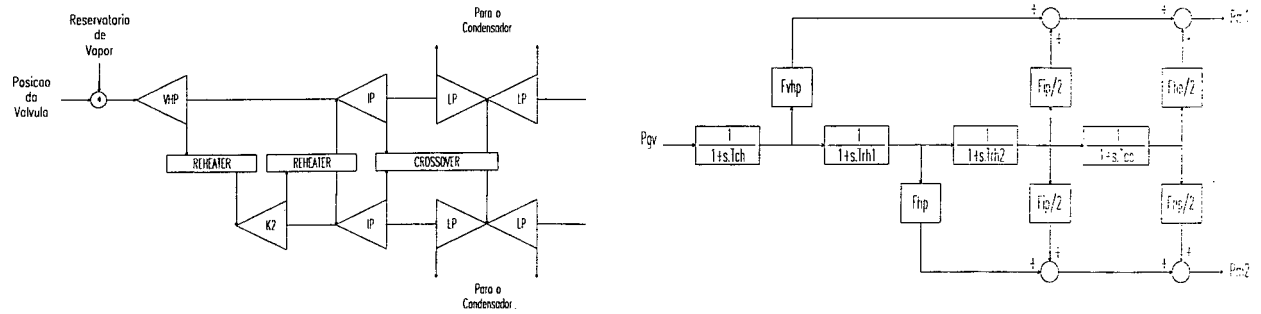


Figura A.21 - “Cross compound”, duplo reaquecimento (#6)

Um modelo geral, proposto em [38,54], pode ser utilizado para representar adequadamente todas as configurações mais comuns das turbinas térmicas (figuras A.16 até A.21). A figura A.22 ilustra o modelo geral utilizado para turbinas térmicas.

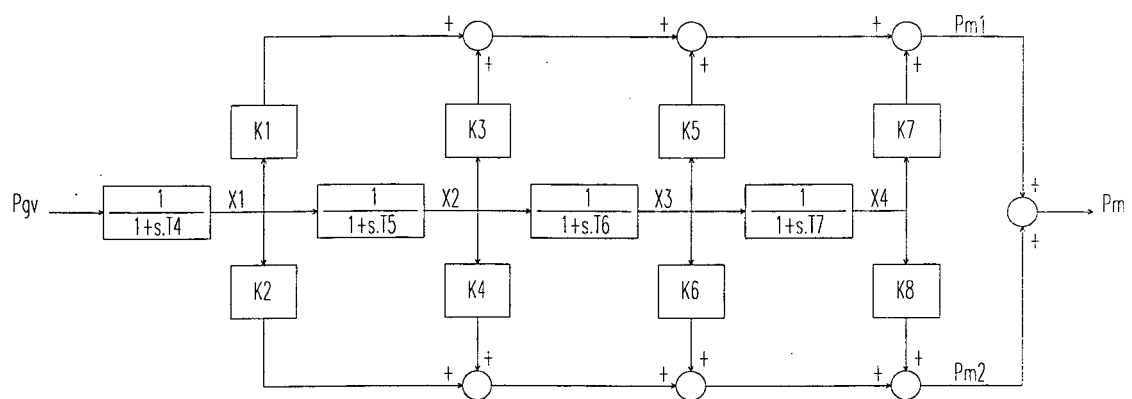


Figura A.22 - Modelo Geral para Turbinas Térmicas

As constantes K_1, K_2, \dots, K_8 do modelo definem frações da potência mecânica desenvolvida em cada estágio e as constantes de tempo T_4, T_5, \dots, T_7 são os atrasos devido à circulação do vapor nas tubulações da turbina.

A seleção entre as configurações possíveis para as turbinas térmicas é feita através de

uma apropriada definição dos parâmetros K_1, K_2, \dots, K_8 e T_4, T_5, \dots, T_7 do modelo. A tabela A.1 demonstra o relacionamento existente entre os parâmetros do modelo geral e os parâmetros das configurações apresentadas anteriormente.

	<i>Constantes de Tempo</i>				<i>Fatores de Proporção</i>							
	T_4	T_5	T_6	T_7	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	K_8
#1	T_{CH}				1							
#2	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}		F_{HP}		F_{IP}		F_{LP}			
#3	T_{CH}	T_{RH1}	T_{RH2}	T_{CO}	F_{VHP}		F_{HP}		F_{IP}		F_{LP}	
#4	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}		F_{HP}			F_{IP}	$F_{LP}/2$	$F_{LP}/2$		
#5	T_{CH}	T_{RH}	T_{CO}		F_{HP}		F_{IP}			F_{LP}		
#6	T_{CH}	T_{RH1}	T_{RH2}	T_{CO}	F_{VHP}			F_{HP}	$F_{IP}/2$	$F_{IP}/2$	$F_{LP}/2$	$F_{LP}/2$

Tabela A.1 - Parâmetros do Modelo Geral x Configurações das Turbinas Térmicas

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo geral são :

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_4} \cdot P_{gv} - \frac{1}{T_4} \cdot X_1 \quad (A.105)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_5} \cdot X_1 - \frac{1}{T_5} \cdot X_2 \quad (A.106)$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_6} \cdot X_2 - \frac{1}{T_6} \cdot X_3 \quad (A.107)$$

$$\dot{X}_4 = \frac{1}{T_7} \cdot X_3 - \frac{1}{T_7} \cdot X_4 \quad (A.108)$$

$$P_m = P_{m1} + P_{m2} \quad (A.109)$$

$$\begin{aligned} P_{m1} &= K_7 \cdot X_4 + K_5 \cdot X_3 + K_3 \cdot X_2 + K_1 \cdot X_1 \\ P_{m2} &= K_8 \cdot X_4 + K_6 \cdot X_3 + K_4 \cdot X_2 + K_2 \cdot X_1 \end{aligned} \quad (A.110)$$

A.1.5.2. Turbinas Hidráulicas [38,50,54,55,57,60] :

As turbinas hidráulicas convertem a energia da água nos condutos forçados em potência mecânica. Em geral, a representação de turbinas hidráulicas nos estudos da dinâmica de SEE tem sido feita pelo seu modelo linearizado [54,55]. Entretanto este modelo não é adequado para representar o comportamento dinâmico das turbinas hidráulicas em simulações de longa dura-

ção, quando um modelo com maior riqueza de detalhes é necessário. A referência [55] apresenta detalhadamente diversos modelos para representar turbinas hidráulicas, onde são representados efeitos como coluna d'água no conduto forçado, modelos de ondas viajantes, chaminés de equilíbrio, múltiplos condutos forçados, etc.

A seguir são descritos dois modelos para representar turbinas hidráulicas. O primeiro é o modelo linearizado [54,55], e o segundo é um modelo não linear, selecionado de [55], que considera apenas o efeito da coluna d'água não elástica no conduto forçado.

A.1.5.2.1. Modelo Linearizado :

O modelo linearizado para turbinas hidráulicas é usualmente utilizado em simulações de curta duração, onde o efeito da turbina deve ser representado. A figura A.23 apresenta o diagrama de blocos do modelo linearizado.

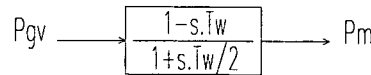


Figura A.23 - Turbina Hidráulica (modelo linearizado)

Para evitar que o sinal de entrada na função de transferência da turbina seja derivado, o diagrama de blocos da figura A.23 deve ser reescrito, assumindo a seguinte forma :

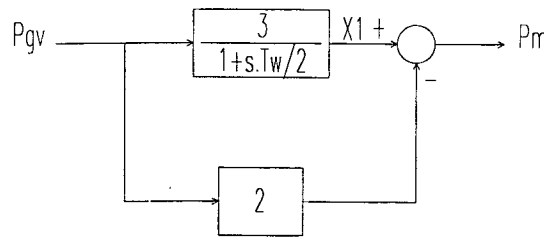


Figura A.24 - Turbina Hidráulica (diagrama de blocos expandido)

A referência [55] sugere que a utilização do modelo linearizado seja evitada, uma vez que ele somente é valido para a análise de pequenas perturbações em torno do ponto de equilíbrio.

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{X}_1 = \frac{3}{T_w/2} \cdot P_{gv} - \frac{1}{T_w/2} \cdot X_1 \quad (A.111)$$

$$P_m = X_1 - 2 \cdot P_{gv} \quad (A.112)$$

A.1.5.2.2. Modelo Não-Linear :

Os modelos não-lineares, propostos em [50,55,57,60], são os mais adequados para representar as turbinas hidráulicas em simulações de longa duração. O modelo não-linear, apresentado na figura A.25, representa turbinas hidráulicas considerando o efeito da coluna d'água no conduto forçado com uma pequena ou sem nenhuma chaminé de equilíbrio.

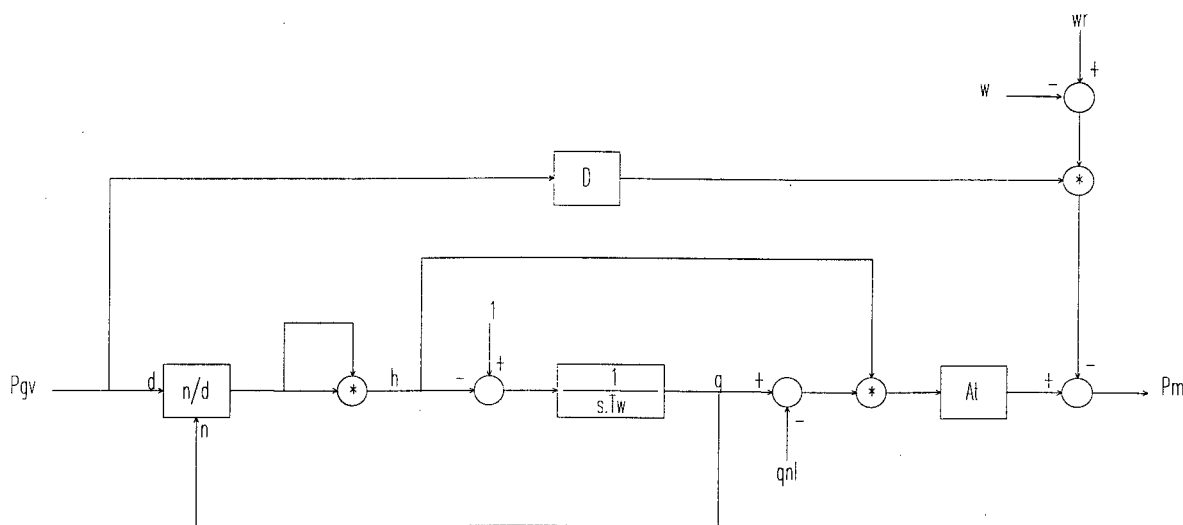


Figura A.25 - Turbina Hidráulica (modelo não-linear)

Embora o modelo não-linear selecionado seja o mais simples, dentre os modelos não-lineares, representa satisfatoriamente o comportamento das turbinas hidráulicas em estudos de longa duração.

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{q} = \frac{1-h}{T_w} \quad (A.113)$$

$$h = \left(\frac{q}{P_{gv}} \right)^2 \quad (A.114)$$

$$P_m = A_t \cdot h \cdot (q - q_{nl}) - P_{gv} \cdot D \cdot (w_r - w) \quad (A.115)$$

A.1.5.3. Turbinas a Gás [39,59,61] :

A turbina a gás é um tipo especial de turbina que gera potência mecânica a partir da energia proveniente da expansão dos gases resultantes da queima do combustível. Este tipo de

turbina não possui um modelo completamente definido para representar seu comportamento em estudos de dinâmica de SEE. Nas referências [39,59] são propostos modelos, em diversos níveis de detalhamento, que procuram representar o comportamento dinâmico das turbinas a gás. A dificuldade para obtenção de parâmetros corretos e a inexistência deste tipo de turbina no sistema elétrico brasileiro levaram a seleção de um modelo bastante simplificado [39] para representar as turbinas a gás. O modelo é apresentado na figura A.26.

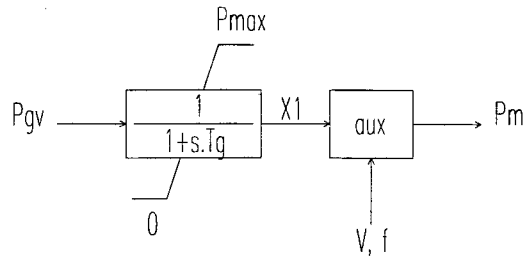


Figura A.26 - Turbina a Gás (modelo simplificado)

O modelo da figura A.26 pode ser derivado dos modelos mais detalhados [59] assumindo-se as seguintes suposições [39] :

- * o sistema de alimentação de combustível é desconsiderado;
- * os combustores e o controle de temperatura da turbina são desconsiderados;
- * o efeito da redução da potência de saída da turbina devido a variação da tensão (V) e da frequência (f) nos equipamentos auxiliares é algebricamente incluído através de um ganho na saída da turbina (aux). Este ganho é função da tensão e da frequência nos equipamentos auxiliares de controle da turbina [39].

* o efeito da variação da potência de saída da turbina devido a variações ambientais de temperatura é incluído através do ajuste do limitador do modelo, onde P_{max} é reduzido nos dias quentes do verão e aumentado no inverno;

- * o regulador de velocidade associado a turbina é o modelo simplificado (item A.1.4.3).

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_g} \cdot \left[P_o + \frac{1}{R} \cdot (w_r - w) \right] - \frac{1}{T_g} \cdot X_1 \quad (A.116)$$

$$aux = f(V, f) \quad (A.117)$$

$$P_m = aux \cdot X_1 \quad (A.118)$$

A.1.6. Caldeiras

As Caldeiras compreendem os elementos principais do Sistema de Geração de Vapor em unidades de geração térmicas. Em estudos de longa duração não é possível sustentar a hipótese de que as unidades de geração térmica possuem disponibilidade infinita de vapor. Assim, o comportamento dinâmico das caldeiras é significativo e deve ser considerado na simulação.

Basicamente existem dois tipos de caldeiras : as Caldeira Tipo Tambor e as Caldeiras de Fluxo Direto. As caldeiras tipo tambor são as mais comumente utilizadas nas unidades térmicas. Por esta razão existem diversos modelos para descrever o seu comportamento dinâmico, em diferentes níveis de detalhes [39,56,58,62,63,64]. As caldeiras de fluxo direto possuem projeto mais recente, com poucos modelos disponíveis para descrever o seu comportamento [39].

A seguir é descrito um modelo de caldeira adequado para representar o comportamento das caldeiras do tipo tambor [39,63]. Caldeiras de fluxo direto não são especificamente tratadas neste trabalho. No entanto apenas a dinâmica do combustível do modelo tipo tambor deve ser modificada para representar caldeiras de fluxo direto [39].

A.1.6.1. Caldeira Tipo Tambor [39,63] :

Este tipo de caldeira utiliza o tambor como reservatório de energia térmica. Desta forma a caldeira pode manter a pressão do vapor na válvula quase constante por alguns instantes após um aumento súbito de carga. No entanto, esta disponibilidade de vapor não é infinita e a pressão na válvula tende a cair. A figura A.27 ilustra o modelo adotado para caldeiras do tipo tambor.

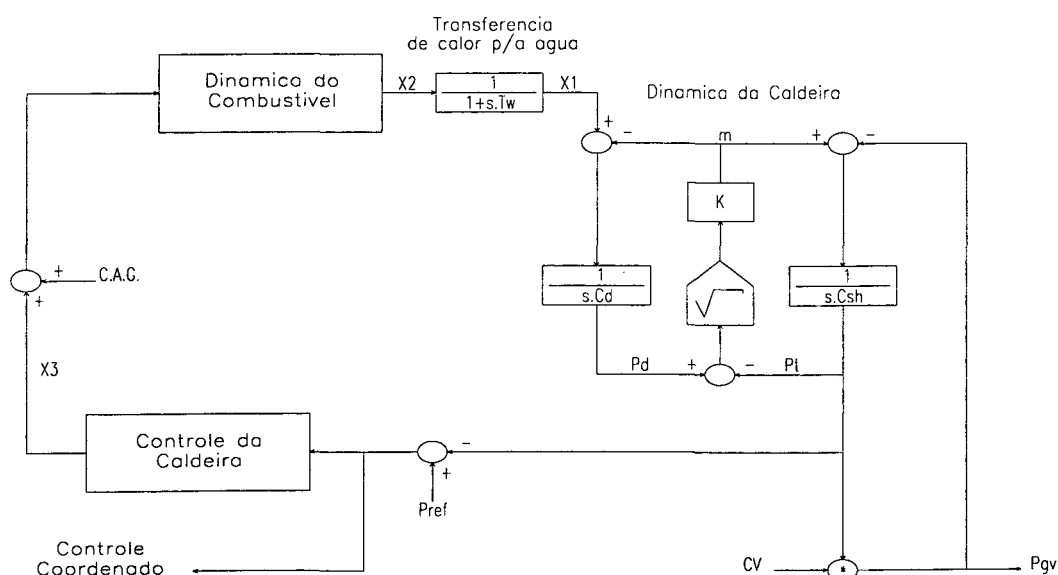


Figura A.27 - Modelo para Caldeira do Tipo Tambor

As caldeiras do tipo tambor podem ser divididas em quatro partes básicas : a dinâmica da caldeira que é associada à dinâmica do reservatório de vapor e ao superaquecedor, a transferência de calor para a água, a dinâmica da alimentação do combustível e o controle da caldeira.

A dinâmica da caldeira é descrita pelo conjunto de equações A.119, A.120 e A.121, onde as constantes de tempo (C_D e C_{SH}) são geralmente bastante altas e estão associadas às equações de pressão de vapor no tambor (P_D) e pressão de vapor disponível na válvula (P_t). Isto mantém a pressão de vapor na válvula quase constante nos instantes logo após um distúrbio. A pressão decai a medida que esgota-se o vapor armazenada no tambor.

$$m = K \cdot \sqrt{P_D - P_t} \quad (\text{A.119})$$

$$\dot{P}_D = \frac{1}{C_D} \cdot (X_1 - m) \quad (\text{A.120})$$

$$\dot{P}_t = \frac{1}{C_{SH}} \cdot (m - P_{gv}) \quad (\text{A.121})$$

A transferência de calor da fornalha para a película d'água é descrita pela equação A.122.

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_w} \cdot X_2 - \frac{1}{T_w} \cdot X_1 \quad (\text{A.122})$$

A dinâmica da alimentação do combustível difere conforme o tipo de combustível utilizado. Os principais combustíveis para caldeiras do tipo tambor são :

* **Óleo ou Gás** : o modelo utilizado para representar a alimentação da fornalha com óleo ou gás é bastante simples [56], conforme ilustra a figura A.28. A constante de tempo T_a , na equação A.123, representa o atraso devido a alimentação e queima do combustível..

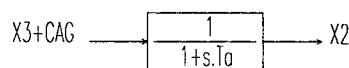


Figura A.28 - Dinâmica do Combustível (Óleo/Gás)

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_a} \cdot (X_3 + CAG) - \frac{1}{T_a} \cdot X_2 \quad (\text{A.123})$$

* **Carvão** : o modelo adotado para representar a alimentação da fornalha com carvão é ilustrado na figura A.29. Neste modelo é introduzido um termo exponencial do tipo $e^{-s.Td}$ na função de transferência que representa o atraso de tempo referente a alimentação e queima do

combustível na fornalha.

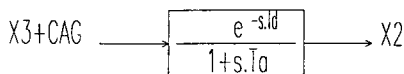


Figura A.29 - Dinâmica do Combustível (Carvão)

As referências [39,64] propõem que o termo exponencial do modelo seja substituído por sua expansão em série de Maclaurin, o que conduz ao desenvolvimento do diagrama ilustrado na figura A.30 para representar o modelo.

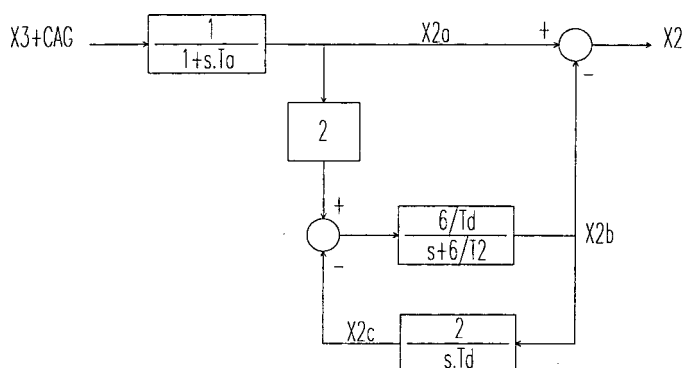


Figura A.30 - Modelo para representar o atraso $e^{sT_d}/(1+sT_d)$

As equações que descrevem o modelo da figura A.30 são :

$$\dot{X}_{2a} = \frac{1}{T_a} \cdot (X_3 + CAG) - \frac{1}{T_a} \cdot X_{2a} \quad (\text{A.124})$$

$$\dot{X}_{2b} = \frac{6}{T_d} \cdot (2 \cdot X_{2a} - X_{2c} - X_{2b}) \quad (\text{A.125})$$

$$\dot{X}_{2c} = \frac{2}{T_d} \cdot X_{2b} \quad (\text{A.126})$$

$$X_2 = X_{2a} - X_{2b} \quad (\text{A.127})$$

O controle da caldeira é representado em [58,63] pelo modelo da figura A.31, entretanto é mais ilustrativo reescrever o diagrama de blocos na forma apresentada na figura A.32.

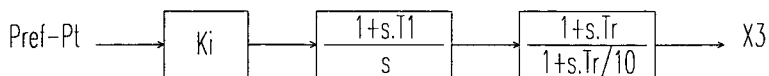


Figura A.31 - Controle da Caldeira

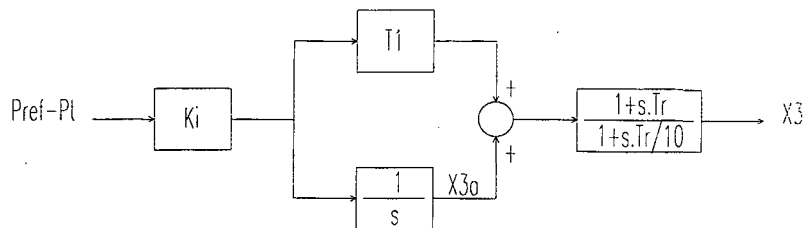


Figura A.32 - Modelo para o Controle da Caldeira

As equações que descrevem o controle são :

$$\dot{X}_{3a} = K_I \cdot (P_{ref} - P_t) \quad (A.128)$$

$$X_3 = 10 \cdot [X_{3a} + T_1 \cdot K_I \cdot (P_{ref} - P_t)] + X'_3 \quad (A.129)$$

$$\dot{X}'_3 = \left(\frac{10}{T_r} - \frac{100}{T_r} \right) \cdot [X_{3a} + T_1 \cdot K_I \cdot (P_{ref} - P_t)] - \frac{10}{T_r} \cdot X'_3 \quad (A.130)$$

A.1.7. Reator Nuclear

A energia proveniente de unidades de geração termonucleares é cada vez mais importante nos modernos SEE. Países desenvolvidos como a França e os Estados Unidos possuem grande parte de sua capacidade de geração fornecida por unidades de geração termonucleares. Por esta razão o comportamento dinâmico destas unidades deve ser considerado nas simulações da dinâmica de SEE, especialmente em simulações de longa duração.

O elemento diferencial entre uma unidade de geração termonuclear e uma unidade térmica comum é o sistema de geração de vapor. Na primeira, o sistema de geração de vapor é composto por um reator nuclear, enquanto que na segunda é composto pelas tradicionais caldeiras à carvão, óleo ou qualquer outro combustível. Assim, todos os modelos para os demais elementos da unidade de geração não são alterados (turbinas, reguladores de velocidade, máquinas síncronas, etc). Apenas o modelo da caldeira é substituído por um modelo de reator nuclear.

Existem dois tipos básicos de reatores nucleares sendo atualmente utilizados, o PWR (“*Pressurized Water Reactor*”) e o BWR (“*Boiling Water Reactor*”) [39,62,65,66,67,68]. A modelagem para estes reatores em simulações da dinâmica de SEE não é bem estabelecida, assim não existem modelos definitivamente aceitos para sua representação nestes tipos de estudos.

A.1.7.1. Reator Nuclear BWR [39,65,66,67,68] :

O reator nuclear tipo BWR é apresentado na figura A.33 em seus componentes básicos.

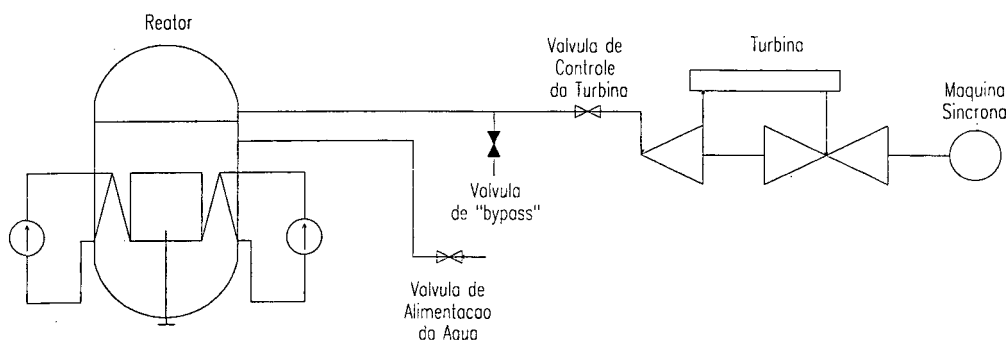


Figura A.33 - Componentes de uma Usina Nuclear com reator do tipo BWR

A característica básica deste tipo de reator é a geração direta de vapor no núcleo do reator, eliminando a necessidade de um trocador de calor independente como gerador de vapor. A produção direta de vapor no núcleo do reator é um método muito eficiente de extração de calor. Entretanto existe sempre o risco de contaminação radioativa da água de refrigeração dos condensadores. Isto torna necessário a proteção contra radiação para as turbinas e os dutos da unidade de geração [68].

O reator nuclear do tipo BWR não será implementado neste trabalho em função da inexistência deste tipo de reator no sistema elétrico brasileiro. Entretanto, podem ser encontrados modelos para reatores deste tipo nas referências [39,62].

A.1.7.2. Reator Nuclear PWR [62,65,66,67,68] :

O reator nuclear tipo PWR é apresentado na figura A.34 em seus componentes básicos.

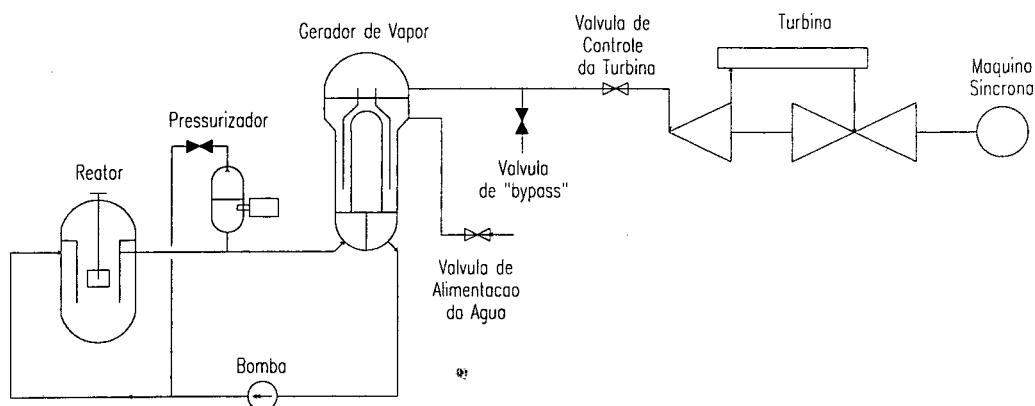


Figura A.34 - Componentes de uma Usina Nuclear com reator do tipo PWR

Este tipo de reator caracteriza-se pela circulação da água de refrigeração do núcleo do reator em um circuito independente de alta pressão, exigindo assim um circuito trocador de calor (*Gerador de Vapor*) para a geração do vapor fornecido a turbina. A adoção de um circuito independente para a água de refrigeração do núcleo do reator elimina a necessidade de proteção contra radiação para as turbinas e dutos. A figura A.34 ilustra os dois circuitos de circulação da água onde observa-se ainda a utilização de um pressurizador no circuito de alta pressão para controlar excessivas variações de pressão neste circuito [68].

Poucos trabalhos apresentam modelos de reatores nucleares para estudos de simulação da dinâmica de SEE. As referências [65,66,67,68] apresentam apenas estruturas funcionais dos reatores nucleares. Somente em [62] é apresentado um modelo completo para reatores do tipo PWR. O modelo, entretanto, apresenta o reator na forma de diagrama de blocos e parâmetros típicos, não fornecendo detalhes da implementação do modelo. O diagrama de blocos e as equações correspondentes são apresentadas a seguir.

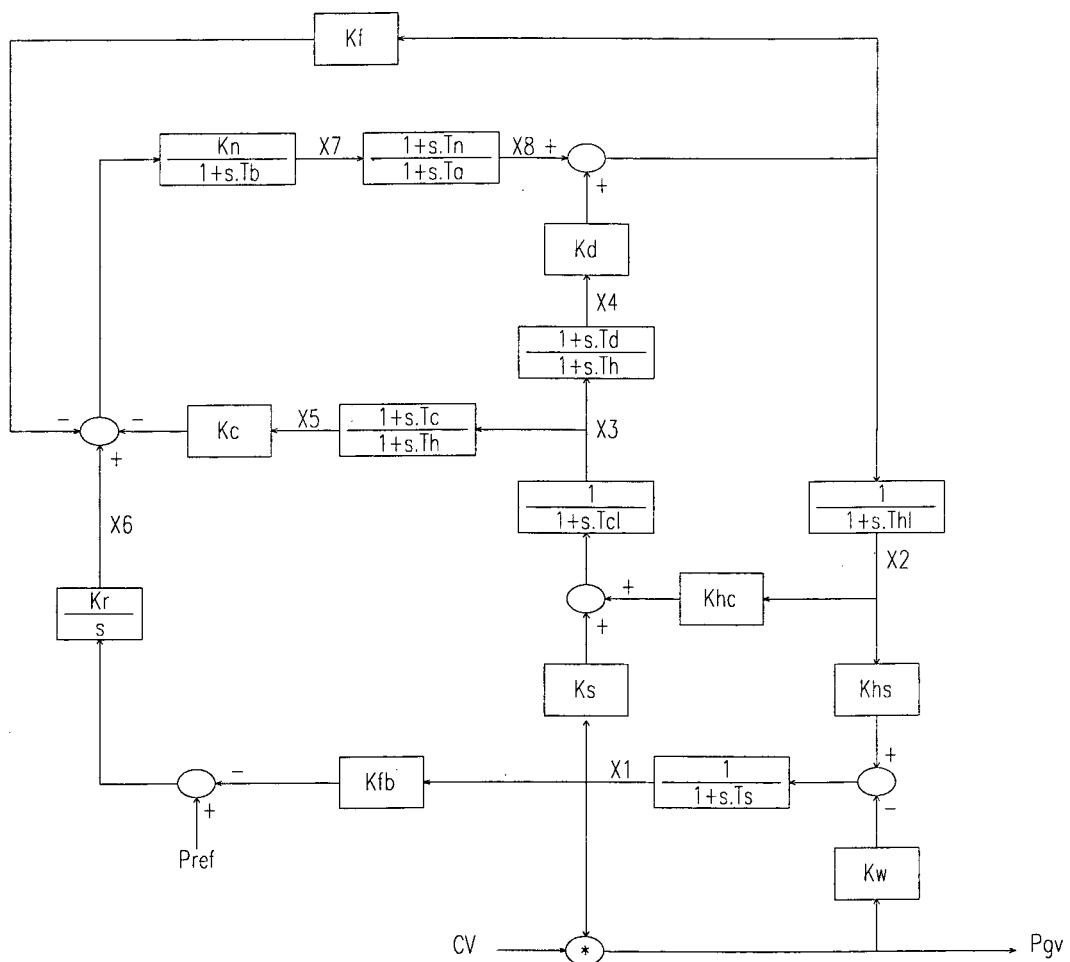


Figura A.35 - Modelo de um Reator Nuclear do tipo PWR

As equações que o modelo define são :

$$\dot{X}_1 = \frac{1}{T_s} \cdot (K_{hs} \cdot X_2 - P_{gv}) - \frac{1}{T_s} \cdot X_1 \quad (\text{A.131})$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_{hl}} \cdot (X_8 + K_d \cdot X_4) - \frac{1}{T_{hl}} \cdot X_2 \quad (\text{A.132})$$

$$\dot{X}_3 = \frac{1}{T_{cl}} \cdot (K_{hc} \cdot X_2 + K_s \cdot X_1) - \frac{1}{T_{cl}} \cdot X_3 \quad (\text{A.133})$$

$$X_4 = \frac{T_d}{T_h} \cdot X_3 + X'_4 \quad (\text{A.134})$$

$$\dot{X}'_4 = \left(\frac{1}{T_h} - \frac{T_d}{T_h^2} \right) \cdot X_3 - \frac{1}{T_h} \cdot X'_4 \quad (\text{A.135})$$

$$X_5 = \frac{T_c}{T_h} \cdot X_3 + X'_5 \quad (\text{A.136})$$

$$\dot{X}'_5 = \left(\frac{1}{T_h} - \frac{T_c}{T_h^2} \right) \cdot X_3 - \frac{1}{T_h} \cdot X'_5 \quad (\text{A.137})$$

$$\dot{X}_6 = K_r \cdot (P_{ref} - K_{fb} \cdot X_1) \quad (\text{A.138})$$

$$\dot{X}_7 = \frac{K_n}{T_b} \cdot (X_6 - K_c \cdot X_5 - K_f \cdot X_8 - K_f \cdot K_d \cdot X_4) - \frac{1}{T_b} \cdot X_7 \quad (\text{A.139})$$

$$X_8 = \frac{T_n}{T_a} \cdot X_7 + X'_8 \quad (\text{A.140})$$

$$\dot{X}'_8 = \left(\frac{1}{T_a} - \frac{T_n}{T_a^2} \right) \cdot X_7 - \frac{1}{T_a} \cdot X'_8 \quad (\text{A.141})$$

A.2. Modelagem dos Elementos da Rede Elétrica

Os principais elementos que formam a Rede Elétrica de um SEE são as linhas de transmissão, os transformadores com tap fixo e os elementos série controlados (FACTS e LTCs). As Linhas de transmissão e os transformadores com tap fixo possuem modelos matemáticos plenamente aceitos e validados através de vários anos de intensa utilização em estudos de estabilidade transitória. As constantes de tempo associadas a estes elementos podem ser desconsideradas sem perda de precisão, o que conduz a representação como admitâncias fixas [38]. Esta prá-

tica é adotada na maioria dos programas de simulação dinâmica de SEE.

Os elementos série controlados como transformadores LTC e dispositivos FACTS não podem ter seu comportamento dinâmico desprezado. Usualmente consideram-se estes elementos com uma parcela estática, representada por admitâncias fixas e incorporada às equações da rede, e uma outra parcela dinâmica, que representa o desvio em relação ao comportamento estático e será tratada separadamente da rede elétrica.

A seguir são apresentados os modelos definidos para representar os elementos que compõem a rede elétrica do SEE.

A.2.1. Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão são usualmente representadas por uma impedância série e uma admitância em derivação que representam o seu efeito capacitivo. No entanto é mais conveniente representar as LTs por um circuito equivalente π formado pelas admitâncias complexas da LT. Assim o circuito equivalente é descrito pela admitância (Y_{ij}), compondo o ramo série, e pela susceptância (B), compondo os ramos ligados a terra [24,69]. A figura A.36 ilustra o circuito equivalente utilizado para representar linhas de transmissão.

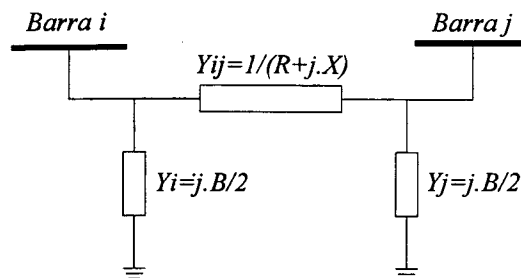


Figura A.36 - Modelo π para Linhas de Transmissão

A.2.2. Transformadores

A modelagem matemática geralmente utilizada para representar transformadores considera que a relação de espiras (posição do tap) não varia durante o intervalo de simulação. Esta consideração pode ser aplicada a estudos de curta duração. Entretanto em simulações de longa duração a ação do mecanismo de variação automática dos taps, presente nos transformadores LTCs, deve ser considerada. Por esta razão são propostos dois modelos para representar trans-

formadores, o primeiro considerando tap fixo [24,69] e o segundo considerando o mecanismo de variação automática dos taps [70,71]. Transformadores com relação de espiras complexa (defasadores) não serão modelados neste trabalho.

A.2.2.1. Transformadores com tap fixo [69]

A representação geral de transformadores com tap fixo consiste basicamente de uma impedância (Z_{ij}) em série com um transformador ideal, representado pela relação de transformação $a:1$ [69]. A figura A.37 ilustra o modelo utilizado para representar os transformadores. A reatância de magnetização foi desprezada.

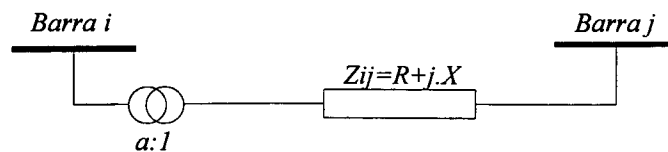


Figura A.37 - Modelo do Transformador

O modelo de transformador adotado pode ser representado por um circuito equivalente π , onde a determinação das admitâncias do circuito é feita pelas equações A.142, A.143 e A.144 descritas abaixo[69]. A figura A.38 ilustra o circuito equivalente π para os transformadores e a posição das admitâncias no modelo.

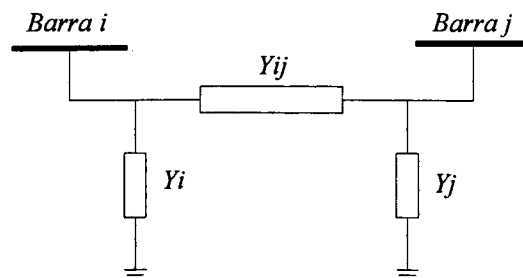


Figura A.38 - Modelo π para o Transformador

$$Y_{ij} = \frac{1}{a} \cdot Z_{ij}^{-1} \quad (\text{A.142})$$

$$Y_i = \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \cdot Z_{ij}^{-1} \quad (\text{A.143})$$

$$Y_j = \left(1 - \frac{1}{a} \right) \cdot Z_{ij}^{-1} \quad (\text{A.144})$$

A.2.2.2. Transformadores com tap variável - LTC [70,71] :

Os transformadores LTC contribuem para a manutenção do nível de tensão através da variação da sua relação de espiras (posição dos taps), sendo este controle freqüentemente feito de maneira automática pelo transformador. A figura A.39 ilustra o mecanismo que controla a mudança de tap do transformador [70,71].

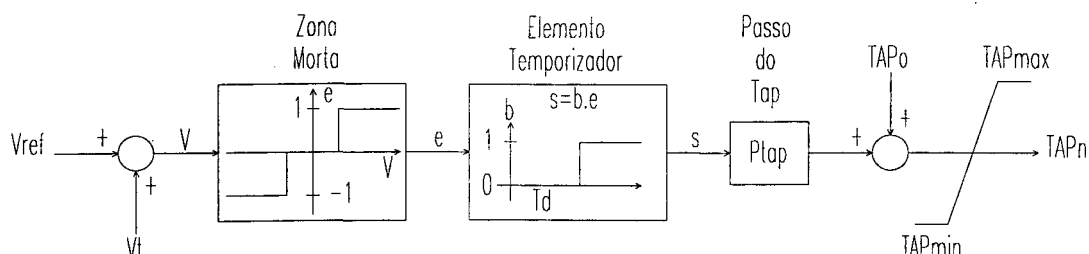


Figura A.39 - Mecanismo de variação dos taps de LTCs

O sensor de tensão do modelo detecta desvios acima de uma determinada tolerância (zona morta) quando então aciona o elemento temporizador. Este elemento compreende a temporização do relé mais o tempo de acionamento do comutador. A posição do tap é alterada se o desvio de tensão manter-se acima da tolerância durante o tempo de retardo do temporizador. O limitador impede que a posição do tap exceda limites práticos do equipamento [70,71].

A utilização do modelo π , em sua formulação original, torna-se inconveniente para representar LTCs, uma vez que implica na variação das admitâncias do modelo toda vez que o tap do transformador é alterado, conforme equações A.142, A.143 e A.144.

A técnica da compensação por injeções de corrente [24] pode ser utilizada para contornar este problema. Assim o efeito do comportamento dos transformadores LTCs é separado em duas parcelas, uma parcela estática e outra dinâmica.

* **Parcela Estática** : a parcela estática é definida pelo circuito equivalente π do LTC utilizando o tap da condição em regime permanente para formar o modelo. Este tap é mantido fixo durante toda a simulação e conseqüentemente as admitâncias do modelo não são alteradas. Isto permite incorporar a parcela estática dos LTCs nas equações normais da rede elétrica;

* **Parcela Dinâmica** : a parcela dinâmica define o desvio em relação ao comportamento estático devido a variações no tap, através de injeções de corrente adequadamente calculadas. A variação dos taps é então algebricamente incluída na simulação através da representação de seu efeito por injeções de corrente nas barras terminais do transformador [24].

O efeito dos transformadores LTCs é mais destacado em simulações de longa duração devido ao elevado tempo de retardo para atuação, tipicamente entre 20 e 60 segundos. A atuação dos taps é realizada de maneira discreta sendo alterado apenas um tap para cada comando do temporizador. A zona morta definida no modelo é importante para aumentar a vida útil do comutador do LTC, evitando atuações desnecessárias.

- Equações para as Injeções de Corrente da Parcela Dinâmica :

O efeito da variação das admitâncias no modelo π pode ser incluído na simulação através de injeções de correntes de compensação (I_c) nas barras terminais do transformador LTC. As injeções de corrente são calculadas utilizando uma matriz admitância ($|\Delta Y|$) que representa as correções nas admitâncias do LTC ocasionada pela variação no tap. A equação A.145 define a expressão para o cálculo das corrente de compensação.

$$|\bar{I}_c| = |\Delta Y| \cdot |\bar{V}| \quad (\text{A.145})$$

A matriz admitância de correções (ΔY) é definida utilizando-se a matriz admitância Y da equação A.146. Esta matriz é formada por um único transformador conectado entre os nós genéricos i e j .

$$|Y| = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{a} \cdot Z_{ij}^{-1} + \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{1}{a} - 1 \right) \cdot Z_{ij}^{-1} & \dots & -\frac{1}{a} \cdot Z_{ij}^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & -\frac{1}{a} \cdot Z_{ij}^{-1} & \dots & \frac{1}{a} \cdot Z_{ij}^{-1} + \left(1 - \frac{1}{a} \right) \cdot Z_{ij}^{-1} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.146})$$

A matriz admitância de correções é então definida na equação A.147, onde a_o representa o tap original do transformador e a_n o tap novo.

$$|\Delta Y| = |Y|_{a=a_o} - |Y|_{a=a_n} \quad (\text{A.147})$$

Os termos resultantes da operação matricial são assim definidos :

$$\Delta Y_{ii} = \left[\frac{1}{a_o^2} \cdot Z_{ij}^{-1} \right] - \left[\frac{1}{a_n^2} \cdot Z_{ij}^{-1} \right] \quad (\text{A.148})$$

$$\Delta Y_{ij} = \Delta Y_{ji} = \left[-\frac{1}{a_o} \cdot Z_{ij}^{-1} \right] - \left[-\frac{1}{a_n} \cdot Z_{ij}^{-1} \right] \quad (\text{A.149})$$

$$\Delta Y_{ij} = \left[Z_{ij}^{-1} \right] - \left[Z_{ij}^{-1} \right] = 0 \quad (\text{A.150})$$

A substituição dos termos A.148, A.149 e A.150 na equação A.145, resulta na seguinte equação matricial :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_{ci} \\ \vdots \\ I_{cj} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \Delta Y_{ii} & \dots & \Delta Y_{ij} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \Delta Y_{ji} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_j \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.151})$$

As expressões para as injeções de corrente podem ser então determinadas :

$$I_{ci} = \Delta Y_{ij} \cdot V_i + \Delta Y_{ji} \cdot V_j \quad (\text{A.152})$$

$$I_{cj} = \Delta Y_{ij} \cdot V_i \quad (\text{A.153})$$

As injeções de corrente de compensação (I_{ci} e I_{cj}) devem ser recalculadas cada vez que o tap ou as tensões nas barras terminais do transformador forem alteradas.

A.2.3. Dispositivos Série Controlados

O desenvolvimento da eletrônica de alta potência possibilitou o surgimento de novos dispositivos de controle (FACTS) para os SEE. Dentre estes dispositivos, os Capacitores Série Controlados e os Defasadores Eletrônicos destacam-se por serem elementos dinâmicos série na rede elétrica. Tais elementos são então representados por admitâncias variáveis nas equações da rede elétrica. Conforme descrito anteriormente, admitâncias variáveis não são convenientes para a formulação das equações da rede elétrica. Por este motivo, o conceito de injeção de correntes de compensação, desenvolvido para os transformadores LTCs, deve ser generalizado para representar qualquer tipo de elemento em série com a rede elétrica.

Capacitores série controlados, defasadores eletrônicos bem como qualquer dispositivo série controlado do sistema podem ser representados por uma parcela estática, geralmente definida na condição em regime permanente do sistema, e por uma parcela dinâmica, definida por alterações nas admitâncias do seu circuito equivalente estático.

- Equações para as Injeções de Corrente generalizadas :

Uma matriz admitância de correções pode então ser formulada para qualquer elemento série conectado entre as barras genéricas i e j . A equação para as injeções de corrente assume então a seguinte forma :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_{ci} \\ \vdots \\ I_{cj} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \Delta Y_{ii} & \dots & \Delta Y_{ij} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \dots & \Delta Y_{ji} & \dots & \Delta Y_{jj} & \dots & 0 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_j \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.154})$$

onde os termos ΔY_{ii} , ΔY_{ij} , ΔY_{ji} e ΔY_{jj} representam as correções à matriz admitância nodal da rede ocasionadas pela ação de um elemento série controlado qualquer. A definição dos termos de correção é determinada pela dinâmica do dispositivo série em particular.

As equações A.155 e A.156 representam as correntes de compensação que devem ser injetadas nas barras terminais do dispositivo série.

$$I_{ci} = \Delta Y_{ii} \cdot V_i + \Delta Y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{A.155})$$

$$I_{cj} = \Delta Y_{ij} \cdot V_i + \Delta Y_{jj} \cdot V_j \quad (\text{A.156})$$

As injeções de corrente devem ser atualizadas sempre que o comportamento dinâmico do dispositivo alterar os termos de correção (ΔY_{ii} , ΔY_{ij} , ΔY_{ji} e ΔY_{jj}) ou as tensões terminais (V_i e V_j).

A.3. Modelagem das Cargas

A carga em SEE, devido a sua complexidade e constituição agregada, é de difícil representação matemática. Ao longo dos anos, vários modelos tem sido propostos para representar o comportamento das cargas. Entretanto não existem ainda modelos plenamente aceitos para sua representação em estudos da dinâmica de SEE [7,8,42,72,73,74,75,76,77].

Para estudos de estabilidade transitória os modelos mais aceitos utilizam uma função polinomial de segundo grau (ou função exponencial) para representar o comportamento da carga em função da tensão na barra. Assim, para o intervalo de tempo destas simulações assume-se que a carga varia unicamente devido a alterações na tensão da barra [38,72,73]

Estas hipóteses, no entanto, não são adequadas para estudos de longa duração, uma vez que não consideram a variação da potência nominal da carga no intervalo de tempo simulado. Isto ocorre devido a alterações na demanda da carga que esta representada. O modelo comumente utilizado para representar este efeito descreve o comportamento da carga segundo uma curva discretizada ao longo do intervalo de simulação [7,8]. Esta técnica permite que o comportamento normal da carga durante o intervalo de tempo considerado seja incorporado à simulação. Entretanto não garante-se que este comportamento seja mantido sob condições de distúrbio no SEE.

Recentes estudos de estabilidade de tensão mostraram ainda a necessidade da utilização de modelos dinâmicos para representar as cargas. Tais como modelos para motores de indução [75, 76,77,78] e modelos agregados dinâmicos [42,74,78].

Por estas razões, a modelagem definitiva para representar o comportamento das cargas em estudos da dinâmica de SEE ainda está longe de ser encontrada. A referência [73] evidencia os benefícios da melhoria na representação das cargas e o impacto que diferentes modelos podem ter sobre diversos tipo de estudos de SEE.

A seguir são apresentados os modelos de carga mais comumente utilizados em estudos dinâmicos de SEE. Todos os modelos apresentados a seguir foram adaptados para incluir os efeitos da variação da frequência do SEE. Esta adaptação é particularmente importante quando o desbalanço entre carga e geração é significativo ou em estudos de ilhamento do SEE [73].

A.3.1. Modelos Estáticos de Carga (Modelo Polinomial) [38,72,73]

Os modelos estáticos de carga representam a potência ativa e reativa em qualquer instante como função da tensão e frequência no mesmo instante [73]. Estes modelos são utilizados na maioria dos programas de estabilidade transitória. A hipótese básica dos modelos estáticos considera que o valor nominal da carga não varia no intervalo de tempo da simulação.

Dentre os modelos estáticos destacam-se :

* **Modelo Polinomial** : este modelo considera o relacionamento entre a carga e a tensão na barra segundo uma equação polinomial, geralmente de segundo grau. As equações A.157 e A.158 apresentam as expressões que definem esta relação para a carga ativa e reativa.

$$P = P_o \cdot \left[a_1 + b_1 \cdot \frac{V}{V_o} + c_1 \cdot \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 \right] \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] \quad (A.157)$$

$$Q = Q_o \cdot \left[a_2 + b_2 \cdot \frac{V}{V_o} + c_2 \cdot \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 \right] \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.158})$$

A representação polinomial para a carga é composta por parcelas para potência, corrente e impedância constante, definidas pelos coeficientes a , b e c respectivamente. As parcelas das equações referentes aos coeficientes d_1 e d_2 representam as correções na potência ativa e reativa da carga devido ao desvio na frequência nominal do SEE [73].

* **Modelo Exponencial** : o modelo exponencial considera o relacionamento entre carga e tensão na barra segundo uma função exponencial. As equações A.159 e A.160 apresentam a representação matemática do modelo exponencial [73].

$$P = P_o \cdot \left(\frac{V}{V_o} \right)^{np} \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.159})$$

$$Q = Q_o \cdot \left(\frac{V}{V_o} \right)^{nq} \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.160})$$

Os coeficientes np e nq definem a curva que representa o comportamento ativo e reativo da carga, respectivamente.

O modelo polinomial é utilizado em grande parte dos programas para simulação da dinâmica de SEE e será utilizado também neste trabalho.

- Conexão da Carga representada pelo Modelo Polinomial à Rede Elétrica [27,38] :

Para a conexão da carga com a rede elétrica é mais conveniente transformar as potências ativas e reativas em injeções equivalentes de corrente. A expressão para a injeção de corrente equivalente na barra é da seguinte forma :

$$\bar{I} = \frac{\bar{S}^*}{\bar{V}^*} \quad (\text{A.161})$$

onde a substituição das equações A.157 e A.158 na equação A.161 e o rearranjo desta, de tal forma que as parcelas de corrente devidas ao comportamento da carga como potência, corrente e impedância constante possam ser explicitadas, resulta na equação A.162 [27].

$$\bar{I} = \bar{I}_P + \bar{I}_I + \bar{I}_Z \quad (\text{A.162})$$

onde

$$\bar{I}_P = \left(\frac{P_o \cdot a_1}{V^*} \right) \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] - j \cdot \left(\frac{Q_o \cdot a_2}{V^*} \right) \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.163})$$

$$\bar{I}_I = \left(\frac{P_o \cdot b_1}{V_o^*} \right) \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] - j \cdot \left(\frac{Q_o \cdot b_2}{V_o^*} \right) \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.164})$$

$$\bar{I}_Z = \left(\frac{P_o \cdot c_1}{|V_o|^2} \cdot V \right) \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] - j \cdot \left(\frac{Q_o \cdot c_2}{|V_o|^2} \cdot V \right) \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.165})$$

A representação da carga como uma injeção de corrente possibilita a utilização de um equivalente Norton para representar o efeito da carga na rede elétrica. Desta forma assume-se que a carga é 100% impedância constante, sendo então representada integralmente por uma admitância em derivação na barra (y_o). O efeito das parcelas de potência e corrente constante são então consideradas através de uma injeção de corrente na barra que representa o desvio do comportamento da carga em relação ao modelo com 100% impedância constante. A figura A.40 mostra a representação gráfica do equivalente Norton utilizado para representar a carga.

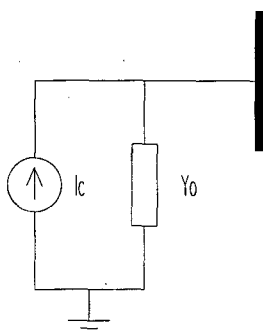


Figura A.40 - Equivalente Norton para os Cargas

onde

$$\bar{y}_o = \frac{P_o}{|V_o|^2} - j \cdot \frac{Q_o}{|V_o|^2} \quad (\text{A.166})$$

$$\bar{I}_c = \bar{I}_o - \bar{I} \quad (\text{A.167})$$

A admitância y_o pode ser adicionada a admitância própria da barra, contribuindo para reforçar a diagonal da matriz admitância nodal do SEE. Os termos I_o e I da expressão A.167 representam, respectivamente, a corrente que está sendo injetada na barra devido à incorporação da admitância y_o na matriz admitância nodal do SEE, e a corrente que deveria estar sendo injetada na barra considerando o modelo de carga. As equações que definem estes termos são apresentadas abaixo :

$$\bar{I}_o = \bar{y}_o \cdot \bar{V} \quad (\text{A.168})$$

$$\bar{I} = \bar{I}_p + \bar{I}_l + \bar{I}_z \quad (\text{A.169})$$

Limitações matemáticas do modelo polinomial impedem a representação correta do comportamento da carga sob baixas tensões. Nesta situação a parcela de potência constante fornece altas correntes de carga, o que é irreal e não se verifica na prática. Por esta razão, geralmente assume-se que o comportamento da carga é de 100% impedância constante quando a tensão cai abaixo de um determinado limite de operação, tipicamente 0.7 pu [50].

A.3.2. Modelos Dinâmicos de Carga

Os modelos dinâmicos de carga expressam a potência ativa e reativa em qualquer instante de tempo como função da magnitude da tensão e frequência em instantes passados, usualmente através de equações diferenciais [73].

A modelagem das cargas utilizando modelos dinâmicos tem sido utilizada em recentes estudos de Estabilidade de Tensão [42,74,78]. Nestes estudos uma representação precisa do comportamento da carga é necessária afim de evidenciar os fenômenos de interesse. Assim, modelos para motores de indução e modelos agregados dinâmicos geralmente são utilizados para representar as cargas nestes estudos [42,74,78].

A seguir são descritos dois modelos dinâmicos de carga. O primeiro refere-se a modelagem atualmente utilizada para representar motores de indução e o segundo refere-se aos modelos agregados dinâmicos para a carga.

A.3.2.1. Motores de Indução [38,75,76,77,78,79]

Os motores de indução foram as primeiras cargas dinâmicas a serem modeladas. Antigos estudos de estabilidade transitória [75,76] já salientavam que a dinâmica de grandes motores de indução, quando devidamente representada, alterava significativamente o comportamento dinâmico do SEE. Mais recentemente o comportamento dinâmico dos motores de indução tem sido amplamente utilizado em estudos de Estabilidade de Tensão [77,78].

Os modelos tradicionalmente utilizados para representar motores de indução [38,50,86] são definidos em termos do escorregamento do motor (S) [38]. A equação que define o escorregamento é apresentada na expressão A.170.

$$S = \frac{w_r - w}{w_r} \quad (\text{A.170})$$

O comportamento dinâmico do motor de indução é descrito por três equações diferenciais para o rotor, uma eletromecânica e duas elétricas, respectivamente equações A.171, A.172 e A.173.

$$\dot{S} = \frac{1}{2 \cdot H} \cdot (T_m - T_e) \quad (\text{A.171})$$

$$\dot{E}'_r = w_r \cdot S \cdot E'_m - \frac{E'_r + (x_o - x') \cdot I_m}{T_o'} \quad (\text{A.172})$$

$$\dot{E}'_m = -w_r \cdot S \cdot E'_r - \frac{E'_m - (x_o - x') \cdot I_r}{T_o'} \quad (\text{A.173})$$

onde

$$T_m = a + b \cdot (1 - S) + c \cdot (1 - S)^2 \quad (\text{A.174})$$

$$T_e = \frac{E'_r \cdot I_r + E'_m \cdot I_m}{w_r} \quad (\text{A.175})$$

A equação eletromecânica, equação A.171, é definida em função de torques (mecânico e elétrico) e não potência [38], uma vez que a velocidade do rotor não pode ser assumida como próxima da nominal. O torque mecânico (T_m), equação A.174, representa a característica de carga do motor, sendo definido por uma equação polinomial de segunda ordem. Assume-se que a frequência na barra não é alterada, conduzindo ao termo $(1-S)$ em p.u. para a velocidade do motor. Se, no entanto, for considerado o efeito da variação da frequência na barra, a expressão para a velocidade passa a ser $(f/f_o - S)$ resultando em resultados mais realistas para o comportamento do motor [73].

- Conexão do Motor de Indução à Rede Elétrica :

As reatâncias do modelo não são afetadas pela posição do rotor [38]. Por esta razão as equações que descrevem o estator do motor de indução podem ser descritas no mesmo sistema de coordenadas complexo utilizado pela rede elétrica. Estas equações são apresentadas a seguir.

$$V_r - E'_r = r \cdot I_r - x' \cdot I_m \quad (\text{A.176})$$

$$V_m - E'_m = r \cdot I_m + x' \cdot I_r$$

O conjunto de equações A.176 pode ser reescrito explicitando-se a injeção de corrente em sua formulação complexa, resultando na equação A.177 abaixo.

$$\bar{I} = \frac{r - j \cdot x'}{r^2 + x'^2} \cdot \bar{V} + \frac{-r + j \cdot x'}{r^2 + x'^2} \cdot \bar{E} \quad (\text{A.177})$$

O estator do motor de indução pode então ser representado por um equivalente Norton na barra, mais adequado para a conexão com a rede elétrica. Assim representa-se o efeito do comportamento do motor de indução na rede elétrica através de uma injeção de corrente na barra e uma admitância em derivação. Esta admitância pode ser adicionada a admitância própria da barra contribuindo para reforçar o condicionamento da matriz admitância nodal do SEE.

A.3.2.2. Modelo Agregado Dinâmico de Carga [42]

Os estudos dinâmicos de Estabilidade de Tensão impulsionaram o desenvolvimento de novos modelos dinâmicos para as cargas [42,74,77,78]. Os modelos desenvolvidos procuram representar a resposta dinâmica típica de um agregado de cargas frente a um degrau de tensão na barra, conforme ilustra a potência ativa (P_o) representada na figura A.41.

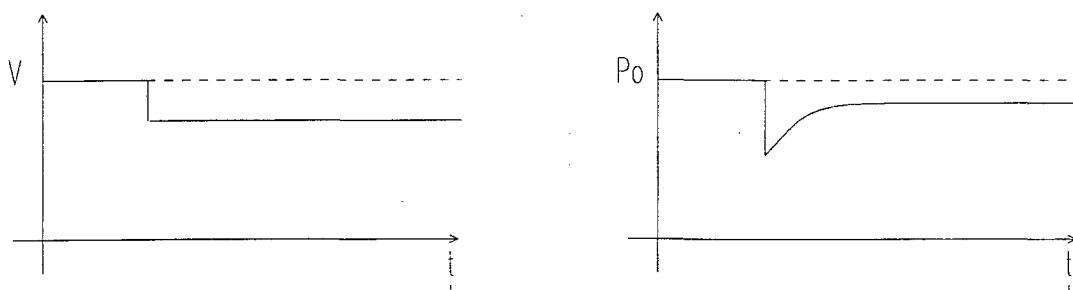


Figura A.41 - Resposta de Típica do Modelo Agregado de Carga a um degrau de Tensão

O modelo apresentado na figura A.42 representa uma derivação do modelo proposto em [42]. Neste modelo as funções $P_t(V)$ e $P_s(V)$, originalmente exponenciais, foram substituídas por funções polinomiais [78]. A parte ativa do modelo está representada na figura A.42, sendo a parte reativa idêntica em estrutura.

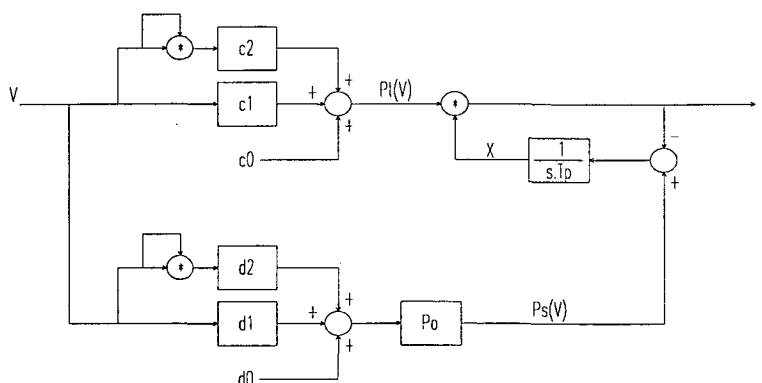


Figura A.42 - Modelo Agregado Dinâmico de Carga

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

* para potência ativa :

$$P_{i(V)} = c_2 \cdot V^2 + c_1 \cdot V + c_o \quad (\text{A.178})$$

$$P_{s(V)} = P_o \cdot (d_2 \cdot V^2 + d_1 \cdot V + d_o) \quad (\text{A.179})$$

$$\dot{X} = \frac{1}{T_p} \cdot (P_{s(V)} - P) \quad (\text{A.180})$$

onde

$$P = P_{i(V)} \cdot X \quad (\text{A.181})$$

* para potência reativa :

$$Q_{i(V)} = e_2 \cdot V^2 + e_1 \cdot V + e_o \quad (\text{A.182})$$

$$Q_{s(V)} = Q_o \cdot (f_2 \cdot V^2 + f_1 \cdot V + f_o) \quad (\text{A.183})$$

$$\dot{Y} = \frac{1}{T_q} \cdot (Q_{s(V)} - Q) \quad (\text{A.184})$$

onde

$$Q = Q_{i(V)} \cdot Y \quad (\text{A.185})$$

• Conexão do Modelo Dinâmico de Carga à Rede Elétrica :

Para a conexão do modelo dinâmico com a rede elétrica é conveniente transformar as potências ativas e reativas, equações A.181 e A.185, em injeções equivalentes de corrente, através da seguinte expressão :

$$\bar{I} = \frac{P - j \cdot Q}{\bar{V}^*} \quad (\text{A.186})$$

A representação da carga como uma injeção de corrente possibilita a utilização de um equivalente Norton para representar o efeito da carga na rede elétrica. Semelhante ao procedimento adotado para o modelo polinomial de carga. Assume-se então que a carga é 100% impedância constante, sendo esta representada integralmente por uma admitância em derivação na barra (y_o), descrita pela equação A.187.

$$\bar{y}_o = \frac{P_o}{|V_o|^2} - j \cdot \frac{Q_o}{|V_o|^2} \quad (\text{A.187})$$

O efeito do comportamento dinâmico da carga na rede elétrica é incluído através de uma injeção de corrente que representa o desvio do comportamento da carga dinâmica em relação ao modelo estático com 100% impedância constante, conforme a equação A.188.

$$\bar{I}_c = \bar{I}_o - \bar{I} \quad (\text{A.188})$$

onde

$$\bar{I}_o = \bar{y}_o \cdot \bar{V} \quad (\text{A.189})$$

O termo I_o , da equação A.188, representa a corrente que está sendo injetada na barra, devido a incorporação da admitância y_o na matriz admitância nodal do SEE, e o termo I representa a corrente que deveria estar sendo injetada na barra considerando o comportamento dinâmico do modelo.

A.3.3. Curva de Carga

Para estudos de longa duração não é mais possível sustentar a hipótese de que a potência nominal da carga permanece inalterada, sendo necessário representar a variação da carga ao longo do intervalo de tempo considerado. A maneira mais adequada para representar este comportamento da carga é através da utilização de curvas de carga pré-determinadas [7,8].

Uma curva de carga descreve a demanda média da carga, em intervalos discretos, durante um determinado período de tempo. A figura A.43 apresenta uma curva de carga típica e sua representação discretizada.

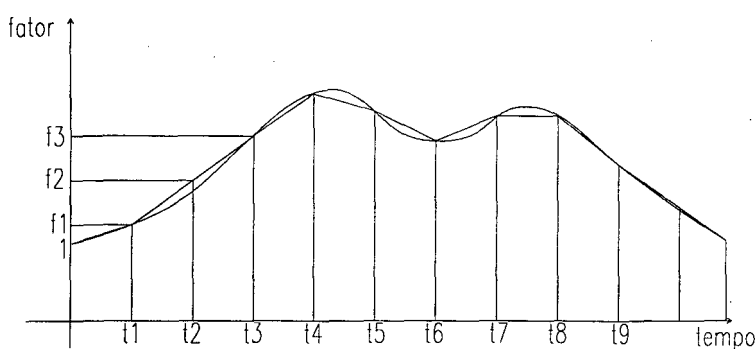


Figura A.43 - Curva Normalizada de Carga

A representação da carga segundo uma curva discretizada no tempo implica na adoção de uma curva de carga individual para cada barra de carga do SEE. Para evitar isto, faz-se uma normalização dos potências representadas ao longo da curva de carga em relação a potência no

instante t_o . Isto define uma curva de fatores de multiplicação para as potências nominais das cargas do SEE, e permite a utilização de uma única curva para representar várias cargas que possuam comportamento semelhante no intervalo de tempo considerado. Os pontos intermediários da representação discretizada devem ser determinados por interpolação. Normalmente a interpolação linear é suficiente.

A curva de carga representa então o comportamento da carga em função do tempo. A equação A.190 determina a carga para qualquer instante de tempo sobre a curva.

$$\begin{aligned} P_{(t)} &= P_o \cdot (K_1 \cdot t + K_2) \\ Q_{(t)} &= Q_o \cdot (K_1 \cdot t + K_2) \end{aligned} \quad (\text{A.190})$$

onde

$$K_1 = \frac{f_n - f_{n+1}}{t_n - t_{n+1}} \quad (\text{A.191})$$

$$K_2 = \frac{f_{n+1} \cdot t_n - f_n \cdot t_{n+1}}{t_n - t_{n+1}} \quad (\text{A.192})$$

Os coeficientes K_1 e K_2 , definidos em A.191 e A.192, representam os parâmetros da reta de interpolação para dois pontos consecutivos quaisquer da curva de carga, genericamente (f_n, t_n) e (f_{n+1}, t_{n+1}) .

A utilização da curva de carga permite então que o comportamento da carga durante o intervalo de tempo considerado seja incorporado à simulação.

As equações apresentadas para o modelo polinomial de carga devem incorporar então a variação da carga em função do tempo. Assim P_o e Q_o das equações A.163, A.164 e A.165 devem ser substituídos por $P(t)$ e $Q(t)$. A equação para a injeção de corrente na barra assume a seguinte forma :

$$\bar{I}_{(t)} = \bar{I}_{P(t)} + \bar{I}_{I(t)} + \bar{I}_{Z(t)} \quad (\text{A.193})$$

onde os termos $\bar{I}_{P(t)}$, $\bar{I}_{I(t)}$ e $\bar{I}_{Z(t)}$ são :

$$\bar{I}_{P(t)} = \left(\frac{P_{(t)} \cdot a_1}{V^*} \right) \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] - j \cdot \left(\frac{Q_{(t)} \cdot a_2}{V^*} \right) \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.194})$$

$$\bar{I}_{I(t)} = \left(\frac{P_{(t)} \cdot b_1}{V_o^*} \right) \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] - j \cdot \left(\frac{Q_{(t)} \cdot b_2}{V_o^*} \right) \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.195})$$

$$\bar{I}_{z(t)} = \left(\frac{P_{(t)} \cdot c_1}{|V_o|^2} \cdot V \right) \cdot [1 + d_1 \cdot (f - f_o)] - j \cdot \left(\frac{Q_{(t)} \cdot c_2}{|V_o|^2} \cdot V \right) \cdot [1 + d_2 \cdot (f - f_o)] \quad (\text{A.196})$$

De modo semelhante ao procedimento adotado para o modelo polinomial de carga, assume-se que a carga é 100% impedância constante. Desta forma a carga pode ser representada integralmente por uma admitância em derivação na barra (v_o). O efeito da variação da carga em função do tempo é considerado através de uma injeção de corrente na barra que representa o desvio do comportamento da carga em relação ao modelo com 100% impedância constante, sendo esta corrente representada pela equação abaixo.

$$\bar{I}_c = \bar{I}_o - \bar{I}_{(t)} \quad (\text{A.197})$$

onde

$$\bar{I}_o = \bar{y}_o \cdot \bar{V} \quad (\text{A.198})$$

$$\bar{I}_{(t)} = \bar{I}_{p(t)} + \bar{I}_{I(t)} + \bar{I}_{z(t)} \quad (\text{A.199})$$

A.4. Equipamentos FACTS

O desenvolvimento da tecnologia em eletrônica de alta potência permitiu a introdução de uma série de novos equipamentos controláveis nos SEE. Tais equipamentos foram genericamente denominados dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), e devido a sua alta velocidade de atuação e a um sistema de controle digital podem contribuir significativamente para o desempenho dinâmico dos SEE [53]. Vários dispositivos podem ser associados ao conceito de FACTS, entre eles estão : os compensadores estáticos de reativos, os capacitores série controlados, os amortecedores de ressonância subsíncrona, os amortecedores de ferrossonância, os limitadores de corrente de falta, os pára-raios de alta energia, etc [53].

Alguns destes equipamentos possuem aplicações bem específicas e não serão abordados neste trabalho. Os compensadores estáticos de reativos e os capacitores série controlados, entretanto, são dispositivos de controle de fluxo de potência e devem ser considerados nas simulações da dinâmica de SEE. A elevada velocidade de atuação destes equipamentos torna-os mais significativos em simulações de curto prazo. Entretanto em estudos de longa duração a atuação destes dispositivos para o controle nos níveis de tensão do SEE e no fluxo de potência das linhas de transmissão devem também ser considerados.

A seguir são descritos dois modelos para FACTS, um modelo para representar os compensadores estáticos de reativos e outro para os capacitores série controlados.

A.4.1. Compensador Estático de Reativos (CER)

Os compensadores estáticos de reativos constituem-se, genericamente, por uma susceptância controlável em derivação na barra. Para compensadores do tipo Reator Controlado por Tiristor (RCT) esta susceptância é composta por um reator controlável, através de uma ponte de tiristores, em paralelo com um banco de capacitores fixo. O controle de uma susceptância em derivação na barra permite controlar a potência reativa injetada nesta barra, e consequentemente o nível de tensão da barra. Mais recentemente os compensadores estáticos de reativos tem sido utilizados para o amortecimento de oscilações eletromecânicas no SEE, através da adição de um sinal suplementar à malha de controle do compensador. O modelo comumente utilizado para representar os compensadores estáticos de reativos é apresentado na figura abaixo [53,80].

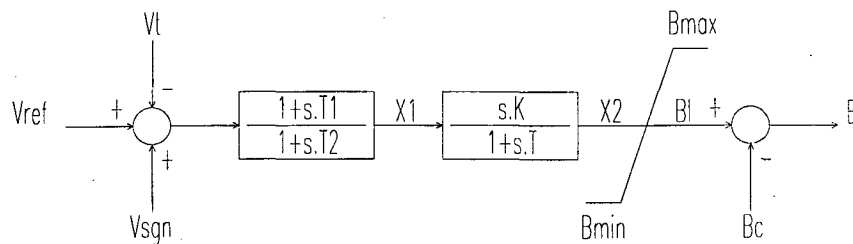


Figura A.44 - Modelo para o Compensador Estático de Reativos

Este modelo apresenta uma entrada para um sinal suplementar (V_{sgn}) à malha de controle do compensador. O sinal suplementar deve ser processado por um controlador com parâmetros convenientemente sintonizados para produzir torques de amortecimento. Entre os sinais utilizados como sinal suplementar estão : a frequência de uma barra do SEE, a velocidade ou a aceleração de um gerador, a potência ativa de uma linha de transmissão, etc [53].

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$X_1 = \frac{T_1}{T_2} \cdot (V_{ref} - V_i + V_{sgn}) + X'_1 \quad (A.200)$$

$$\dot{X}'_1 = \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2^2} \right) \cdot (V_{ref} - V_i + V_{sgn}) - \frac{1}{T_2} \cdot X'_1 \quad (A.201)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{K}{T} \cdot X_1 - \frac{1}{T} \cdot X_2 \quad (\text{A.202})$$

$$B_l = \begin{cases} X_2 \Rightarrow B_{min} < X_2 < B_{max} \\ B_{max} \Rightarrow X_2 > B_{max} \\ B_{min} \Rightarrow X_2 < B_{min} \end{cases} \quad (\text{A.203})$$

$$B = B_l - B_c \quad (\text{A.204})$$

O efeito do compensador estático de reativos reflete-se na rede elétrica através da injeção de corrente correspondente a susceptância equivalente (B) conectada à barra.

A.4.2. Capacitor Série Controlado (CSC)

Os capacitores série controlados, diferentemente dos compensadores estáticos de reativos, são instalados em série na rede elétrica dos SEE. Estes equipamentos constituem-se geralmente por um reator controlado, através de uma ponte de tiristores, em paralelo com um capacitor fixo.

A disposição destes elementos em série com os ramos da rede elétrica permite controlar o fluxo de potência ou a corrente nestes ramos, geralmente uma linha de transmissão. Os capacitores série controlados podem ainda ser utilizados para fornecer torques de amortecimento ao SEE, através da adição de um sinal suplementar na malha de controle do CSC. O modelo comumente utilizado para representar capacitores série controlados em estudos da dinâmica de SEE é apresentado na figura abaixo [53].

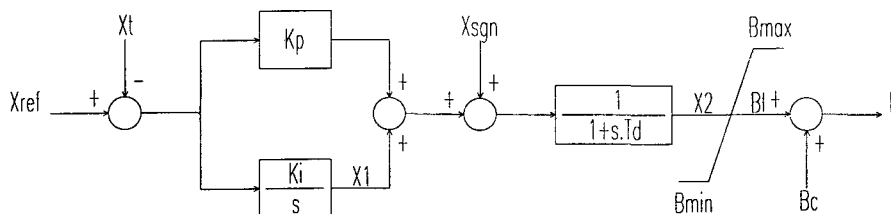


Figura A.45 - Modelo para o Capacitor Série Controlado

O sinal suplementar (X_{sgn}) adicionado à malha de controle do CSC deve ser devidamente processado por um controlador com parâmetros convenientemente sintonizados para produzir torques de amortecimento. Entre os sinais utilizados como sinal suplementar estão : a potência ativa da linha de transmissão, a frequência de uma das barras terminais do CSC, a velocidade de um gerador, etc [53].

As equações que definem o comportamento dinâmico do modelo são :

$$\dot{X}_1 = K_I \cdot (X_{ref} - X) \quad (A.205)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_d} \cdot [K_p \cdot (X_{ref} - X) + X_1 + X_{sgn}] - \frac{1}{T_d} \cdot X_2 \quad (A.206)$$

$$B_l = \begin{cases} X_2 \Rightarrow B_{min} < X_2 < B_{max} \\ B_{max} \Rightarrow X_2 > B_{max} \\ B_{min} \Rightarrow X_2 < B_{min} \end{cases} \quad (A.207)$$

$$B = B_l - B_c \quad (A.208)$$

O efeito da variação da susceptância dos capacitores série controlados reflete-se na rede elétrica através de injeções de corrente de compensação às barras terminais do CSC. Estas injeções de corrente são descritas pelas equações A.155 e A.156, , onde $\Delta Y_{ii}=B$, $\Delta Y_{ij}=-B$, $\Delta Y_{ji}=-B$ e $\Delta Y_{jj}=B$ (ver item A.2.3 - Dispositivos Série Controlados).

A.5. Controle Automático da Geração (CAG)

O controle de velocidade fornecido pelo sistema primário de regulação de velocidade não elimina completamente os desvios na frequência do SEE quando ocorrem variações na carga, assim a demanda é atendida às custas de um desvio na frequência do SEE. Este desvio, embora limitado, é inaceitável para a operação dos SEE, uma vez que existe uma série de restrições de operação quando existe sobre/subfrequência no SEE. Um sistema secundário de regulação de velocidade é então necessário para eliminar os desvios de frequência no SEE [53]. Este sistema denomina-se Controle Automático da Geração (CAG).

O controle automático da geração pode ser utilizado ainda para outros propósitos, além da eliminação do desvio de frequência, sendo os mais comuns :

- minimização dos custos de produção da energia elétrica, através da distribuição adequada da geração entre as diversas unidade de geração que fazem parte do CAG;
- eliminação dos desvios da potência programada de intercâmbio entre áreas de controle;
- manutenção da continuidade do serviço na área de controle durante ilhamentos;
- eliminação dos desvios involuntários de intercâmbio entre áreas de controle, através da correção do erro de tempo acumulado.

Apresenta-se a seguir o conceito de Áreas de Controle, para sistemas interligados, e um modelo para representar o CAG em estudos de simulação da dinâmica de SEE. Alguns aspectos relativos a implementação deste modelo são também apresentados, tais como a determinação da frequência das barras do SEE e a determinação do intercâmbio entre as Áreas de Controle.

A.5.1. Áreas de Controle

Define-se Área de Controle como sendo um subsistema do sistema interligado capaz de suprir suas próprias variações de carga. Uma área de controle pode ser uma única empresa de energia respondendo por suas variações de carga, uma área desta empresa respondendo por variações de carga que ocorrem em um subsistema da própria empresa, ou um grupo de empresas juntas respondendo por qualquer variação de carga que ocorra em seus limites [87]. Cada área de controle define então um esquema de Controle Automático de Geração, e vice-versa.

Os limites de uma área de controle são geralmente determinados pelas linhas de transmissão que pertencem a fronteira desta área com as demais áreas do SEE. Entretanto é possível considerar um SEE inteiro como sendo uma única área de controle. Neste caso não existem linhas de transmissão de fronteira. Uma abordagem rigorosa do tema não é objetivo deste trabalho, podendo ser encontrada nas referências [46,47,48,81,82,87].

Os esquemas de CAG geralmente são desconsiderados nos estudos usuais de simulação da dinâmica de SEE e, por esta razão, a modelagem para representá-los em simulações da dinâmica de SEE não é bem estabelecida. A figura abaixo apresenta um modelo para representar o CAG em simulações da dinâmica de SEE. Este modelo é derivado dos modelos propostos nas referências [81,82], onde foi desconsiderado o despacho econômico entre as unidades sob CAG.

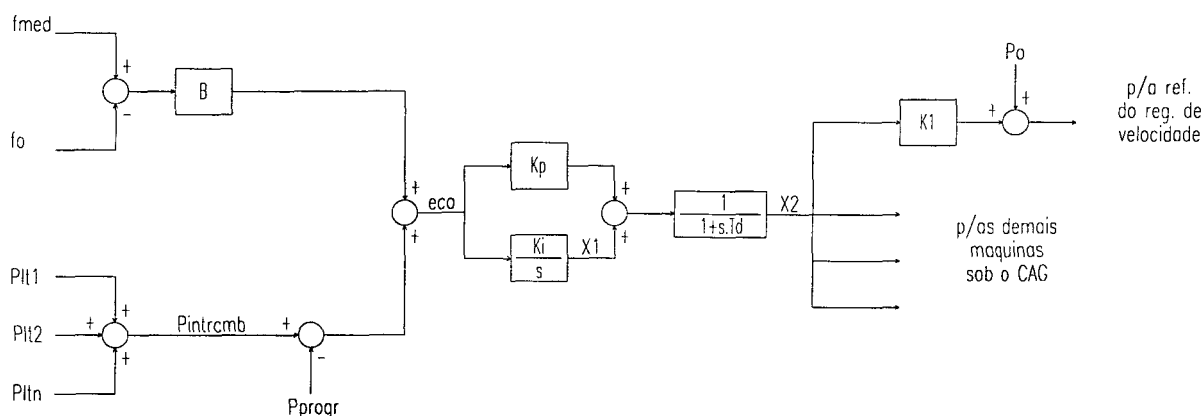


Figura A.46 - Modelo para o Controle Automático de Geração

As equações principais que descrevem o modelo são :

$$eca = (P_{intrcmb} - P_{prog}) + B \cdot (f_{med} - f_o) \quad (A.209)$$

$$\dot{X}_1 = K_i \cdot eca \quad (A.210)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{1}{T_d} \cdot (X_1 + K_p \cdot eca) - \frac{1}{T_d} \cdot X_2 \quad (A.211)$$

O modelo apresentado utiliza o desvio de frequência na área de controle ($f_{med} - f_o$), ponderado por um fator de polarização (B), e o desvio na potência de intercâmbio programada ($P_{intrcmb} - P_{prog}$) para compor o sinal do *Erro de Controle de Área* (eca). Este sinal é aplicado a um controlador *PI* e então aplicado, através de um fator de participação, à referência de carga dos reguladores de velocidade dos geradores sob CAG.

As linhas de transmissão de fronteira, onde são monitorados os fluxos de potência ($P_{LT1}, P_{LT2}, P_{LTn}$ na figura A.46), definem a área de controle do CAG. A frequência média (f_{med}) da área de controle é determinada pela média das frequência determinadas nas barras da área.

Algumas particularidades relativas a implementação do modelo para controle automático de geração devem ser devidamente destacadas :

- **Determinação da Frequência nas Barras** : a frequência média dos SEE é comumente determinada, pela maioria dos programas de simulação da dinâmica de SEE, a partir da velocidade das máquinas síncronas, ponderada pelas suas respectivas inércias. Entretanto, a referência [73] desaconselha esta técnica, e sugere, como melhor aproximação, o cálculo da derivada numérica do ângulo da tensão das barras do SEE. Assim a figura abaixo ilustra o esquema adotado para a determinação da frequência em uma barra qualquer do SEE.

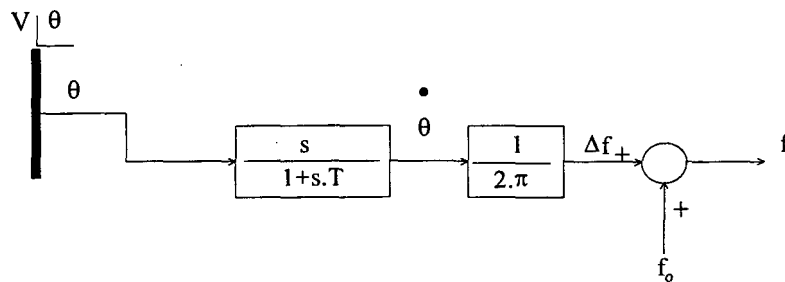


Figura A.47 - Modelo para a determinação da frequência nas barras do SEE

Neste modelo foi adicionado um filtro ao derivador, afim de eliminar variações muito

rápidas na frequência do SEE durante a ocorrência de descontinuidades severas na rede elétrica. A constante de tempo (T) do filtro deve ser adequadamente escolhida para este fim. O sinal de saída do derivador/filtro representa o desvio da velocidade em relação a nominal e deve ser convertido para Hertz através de um fator de conversão adequado.

As equações que descrevem o comportamento do modelo são :

$$\dot{X}' = \frac{1}{T^2} \cdot \theta - \frac{1}{T} \cdot X' \quad (\text{A.212})$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} \cdot \theta - X' \quad (\text{A.213})$$

$$f = f_o + \frac{1}{2\pi} \cdot \Delta f \quad (\text{A.214})$$

- **Determinação do Intercâmbio da Área de Controle** : o fluxo de intercâmbio de uma área de controle é determinado pelos fluxos nas LTs de fronteira desta área. Cada LT de fronteira, entretanto, determina uma barra interna e outra externa à área de controle, sendo o fluxo determinado, geralmente, a partir da barra interna da área. Isto conduz a um erro, uma vez que, a determinação do fluxo na LT de fronteira será ligeiramente diferente para cada área de controle, ou seja as perdas nas LTs de fronteira não são computadas no balanço do intercâmbio.

O modelo proposto neste trabalho, apesar de ter apresentado resultados satisfatórios nas simulações realizadas, é ainda bastante simplificado para representar a atuação de um CAG real em simulações de dinâmica de SEE. Para simulações de longo prazo outras variáveis e efeitos devem ser considerados, como o despacho econômico entre as unidades de geração ou particularidades das estratégias de controle utilizadas.

APÊNDICE B

APLICAÇÃO DA REGRA TRAPEZOIDAL AS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DA MÁQUINA SÍNCRONA

A transformação das equações diferenciais dos elementos do SEE em equações algébricas a diferenças, em um intervalo determinado de tempo ($\Delta t = t_1 - t_0$), é sempre uma tarefa bastante penosa durante a fase de implementação de um programa para simulação da dinâmica de SEE. Por esta razão, este Apêndice apresenta a aplicação da regra trapezoidal implícita as equações diferenciais dos modelos de máquinas síncronas descritos no capítulo 4, e pretende servir como referência para futuros trabalhos na área de simulação da dinâmica de SEE. Utiliza-se, neste apêndice, um *ponto* (•) para destacar as equações diferenciais e uma *seta* (\Rightarrow) para destacar as equações algébricas à diferenças.

A seguir será apresentado o processo de algebrização das equações diferenciais das máquinas síncronas. As equações estão reunidas em três grupos :

- Equações Eletromecânicas do Rotor;
- Equações Elétricas do Rotor e
- Equação Elétrica de Campo do Modelo Não-Convencional.

B.1. Equações Eletromecânicas do Rotor

O conjunto de variáveis de estado eletromecânicas que descrevem o comportamento dinâmico do rotor de uma máquina síncrona são :

- Velocidade angular da máquina síncrona (w) e
- Posição angular do rotor da máquina síncrona (δ).

B.1.1. Velocidade angular da máquina síncrona (w) :

A equação diferencial que descreve o comportamento dinâmico da velocidade angular da máquina síncrona é da seguinte forma :

$$\bullet \quad \dot{w} = \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot [P_m - P_e - D \cdot (w - w_r)] \quad (\text{B.1})$$

Aplicando a regra trapezoidal implícita a equação B.1 teremos :

$$w_{(t_1)} - w_{(t_0)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot (P_{m_{(t_1)}} - P_{e_{(t_1)}} - D \cdot (w_{(t_1)} - w_r)) + \frac{w_r}{2 \cdot H} \cdot (P_{m_{(t_0)}} - P_{e_{(t_0)}} - D \cdot (w_{(t_0)} - w_r)) \right] \quad (\text{B.2})$$

ou

$$w_{(t_1)} - w_{(t_0)} = \frac{w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H} (P_{m_{(t_1)}} - P_{e_{(t_1)}} - D \cdot w_{(t_1)} + P_{m_{(t_0)}} - P_{e_{(t_0)}} - D \cdot w_{(t_0)} + 2 \cdot D \cdot w_r) \quad (\text{B.3})$$

Reescrevendo a expressão B.3 de maneira a explicitar $w_{(t1)}$ teremos :

$$w_{(t_1)} = \frac{w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \cdot (P_{m_{(t_1)}} - P_{e_{(t_1)}}) + \frac{4 \cdot H}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \cdot w_{(t_0)} + \frac{w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \cdot (P_{m_{(t_0)}} - P_{e_{(t_0)}} - D \cdot w_{(t_0)} + 2 \cdot D \cdot w_r) \quad (\text{B.4})$$

Considerando a equivalência

$$\frac{4 \cdot H}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \cdot w_{(t_0)} = \left(\frac{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} - \frac{D \cdot w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \right) \cdot w_{(t_0)} \quad (\text{B.5})$$

podemos então escrever

$$w_{(t_1)} = \frac{w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \cdot (Pm_{(t_1)} - Pe_{(t_1)}) + w_{(t_0)} + \frac{w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \cdot (Pm_{(t_0)} - Pe_{(t_0)} + -2 \cdot D \cdot w_{(t_0)} + 2 \cdot D \cdot w_r) \quad (B.6)$$

Definindo os termos

$$a_w = \frac{w_r \cdot \Delta t}{4 \cdot H + D \cdot w_r \cdot \Delta t} \quad (B.7)$$

$$F_w = w_{(t_0)} + a_w \cdot (Pm_{(t_0)} - Pe_{(t_0)} - 2 \cdot D \cdot w_{(t_0)} + 2 \cdot D \cdot w_r) \quad (B.8)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow w_{(t_1)} = a_w \cdot (Pm_{(t_1)} - Pe_{(t_1)}) + F_w \quad (B.9)$$

B.1.2. Posição angular do rotor da máquina síncrona (δ) :

A equação diferencial que descreve o comportamento dinâmico da posição angular do eixo q da máquina síncrona é da seguinte forma :

$$\bullet \quad \dot{\delta} = w - w_r \quad (B.10)$$

Aplicando a regra trapezoidal implícita a equação B.10 teremos :

$$\delta_{(t_1)} - \delta_{(t_0)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot (w_{(t_1)} - w_r + w_{(t_0)} - w_r) \quad (B.11)$$

ou, reescrevendo a equação B.11 de maneira a explicitar $\delta_{(t_1)}$ teremos :

$$\delta_{(t_1)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot w_{(t_1)} + \delta_{(t_0)} + \frac{\Delta t}{2} \cdot (w_{(t_0)} - 2 \cdot w_r) \quad (B.12)$$

Definindo os termos :

$$a_o = \frac{\Delta t}{2} \quad (B.13)$$

$$F_o = \delta_{(t_0)} + a_o \cdot (w_{(t_0)} - 2 \cdot w_r) \quad (B.14)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow \delta_{(t_1)} = a_o \cdot w_{(t_1)} + F_o \quad (B.15)$$

B.2. Equações Elétricas do Rotor

O conjunto de variáveis de estado elétricas que descrevem o comportamento dinâmico dos circuitos do rotor de uma máquina síncrona são :

- Tensão transitória de eixo quadratura (E'_q);
- Tensão transitória de eixo direto (E'_d);
- Tensão subtransitória de eixo quadratura (E''_q) e
- Tensão subtransitória de eixo direto (E''_d).

B.2.1. Tensão transitória de eixo quadratura (E'_q) :

A equação diferencial que descreve o comportamento dinâmico da tensão transitória de eixo q da máquina síncrona é da seguinte forma :

$$\bullet \quad \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{do}} \cdot [E_{fd} + (x_d - x'_d) \cdot I_d - E'_q] \quad (\text{B.15})$$

Aplicando a regra trapezoidal implícita a equação B.15 teremos :

$$E'_{q(t_1)} - E'_{q(t_0)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{1}{T'_{do}} \cdot (E_{fd(t_1)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_1)} - E'_{q(t_1)}) + \frac{1}{T'_{do}} \cdot (E_{fd(t_0)} - E'_{q(t_0)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_0)}) \right] \quad (\text{B.16})$$

ou

$$E'_{q(t_1)} = E'_{q(t_0)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do}} \cdot [E_{fd(t_1)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_1)} - E'_{q(t_1)}] + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do}} \cdot [E_{fd(t_0)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_0)} - E'_{q(t_0)}] \quad (\text{B.17})$$

Reescrevendo a equação B.17 de maneira a explicitar $E'_{q(t_1)}$ teremos :

$$E'_{q(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot [E_{fd(t_1)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_1)}] + \frac{2 \cdot T'_{do}}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot E'_{q(t_0)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot [E_{fd(t_0)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_0)} - E'_{q(t_0)}] \quad (\text{B.18})$$

Considerando a equivalência

$$\frac{2 \cdot T'_{do}}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot E'_{q(t_o)} = \left(\frac{2 \cdot T'_{do} + \Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} - \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \right) \cdot E'_{q(t_o)} \quad (B.19)$$

podemos escrever

$$E'_{q(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot \left[E_{fd(t_1)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_1)} \right] + E'_{q(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot \left[E_{fd(t_o)} - 2 \cdot E'_{q(t_o)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_o)} \right] \quad (B.20)$$

Definindo os termos

$$a_d = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \quad (B.21)$$

$$F_q = E'_{q(t_o)} + a_d \cdot \left[E_{fd(t_o)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_o)} - 2 \cdot E'_{q(t_o)} \right] \quad (B.22)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow E'_{q(t_1)} = a_d \cdot \left[E_{fd(t_1)} + (x_d - x'_d) \cdot I_{d(t_1)} \right] + F_q \quad (B.23)$$

B.2.2. Tensão transitória de eixo direto (E'_d) :

A equação diferencial que descreve o comportamento dinâmico da tensão transitória de eixo d da máquina síncrona é da seguinte forma :

$$\bullet \quad \dot{E}'_d = \frac{1}{T'_{qo}} \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_q - E'_d \right] \quad (B.24)$$

Aplicando a regra trapezoidal implícita a equação B.24 teremos :

$$E'_{d(t_1)} - E'_{d(t_o)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{1}{T'_{qo}} \cdot \left(-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_1)} - E'_{d(t_1)} \right) + \frac{1}{T'_{qo}} \cdot \left(-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_o)} - E'_{d(t_o)} \right) \right] \quad (B.25)$$

ou

$$E'_{d(t_1)} = E'_{d(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo}} \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_1)} - E'_{d(t_1)} \right] + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo}} \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_o)} - E'_{d(t_o)} \right] \quad (B.26)$$

Reescrevendo a equação B.26 de maneira a explicitar $E'_d(t_1)$ teremos :

$$E'_{d(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_1)} \right] + \frac{2 \cdot T'_{qo}}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \cdot E'_{d(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_o)} - E'_{d(t_o)} \right] \quad (B.27)$$

Considerando a equivalência

$$\frac{2 \cdot T'_{qo}}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \cdot E'_{d(t_o)} = \left(\frac{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} - \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \right) \cdot E'_{d(t_o)} \quad (B.28)$$

podemos escrever

$$E'_{d(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_1)} \right] + E'_{d(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_o)} - 2 \cdot E'_{d(t_o)} \right] \quad (B.29)$$

Definindo os termos

$$a_q = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{qo} + \Delta t} \quad (B.30)$$

$$F_d = E'_{d(t_o)} + a_q \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_o)} - 2 \cdot E'_{d(t_o)} \right] \quad (B.31)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow E'_{d(t_1)} = a_q \cdot \left[-(x_q - x'_q) \cdot I_{q(t_1)} \right] + F_d \quad (B.32)$$

B.2.3. Tensão subtransitória de eixo quadratura (E''_q) :

A equação diferencial que descreve o comportamento dinâmico da tensão subtransitória de eixo q da máquina síncrona é da seguinte forma :

$$\bullet \quad \dot{E}''_q = \frac{1}{T''_{do}} \cdot \left[E'_q + (x'_d - x''_d) \cdot I_d - E''_q \right] \quad (B.33)$$

Aplicando a regra trapezoidal implícita a equação B.33 teremos :

$$E''_{q(t_1)} - E''_{q(t_o)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{1}{T''_{do}} \cdot \left(E'_{q(t_1)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_1)} - E''_{q(t_1)} \right) + \frac{1}{T''_{do}} \cdot \left(E'_{q(t_o)} - E''_{q(t_o)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_o)} \right) \right] \quad (B.34)$$

ou

$$E''_{q(t_1)} = E''_{q(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do}} \cdot \left[E'_{q(t_1)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_1)} - E''_{q(t_1)} \right] + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do}} \cdot \left[E'_{q(t_o)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_o)} - E''_{q(t_o)} \right] \quad (B.35)$$

Reescrevendo a equação B.35 de forma a explicitar $E''_q(t_1)$ teremos :

$$E''_{q(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \cdot \left[E'_{q(t_1)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_1)} \right] + \frac{2 \cdot T''_{do}}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \cdot E''_{q(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \cdot \left[E'_{q(t_o)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_o)} \right]$$

$$+(x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_o)} - E''_{q(t_o)}] \quad (\text{B.36})$$

Considerando a equivalência

$$\frac{2 \cdot T''_{do}}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \cdot E''_{q(t_o)} = \left(\frac{2 \cdot T''_{do} + \Delta t}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} - \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \right) \cdot E''_{q(t_o)} \quad (\text{B.37})$$

podemos escrever

$$E''_{q(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \cdot [E'_{q(t_1)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_1)}] + E''_{q(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \cdot [E'_{q(t_o)} - 2 \cdot E''_{q(t_o)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_o)}] \quad (\text{B.36})$$

Definindo os termos

$$aa_d = \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{do} + \Delta t} \quad (\text{B.37})$$

$$FF_q = E''_{q(t_o)} + aa_d \cdot [E'_{q(t_o)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_o)} - 2 \cdot E''_{q(t_o)}] \quad (\text{B.38})$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow E''_{q(t_1)} = aa_d \cdot [E'_{q(t_1)} + (x'_d - x''_d) \cdot I_{d(t_1)}] + FF_q \quad (\text{B.39})$$

B.2.4. Tensão subtransitória de eixo direto (E''_d) :

A equação diferencial que descreve o comportamento dinâmico da tensão subtransitória de eixo d da máquina síncrona é da seguinte forma :

$$\bullet \quad \dot{E''_d} = \frac{1}{T''_{qo}} \cdot [E'_d - (x'_q - x''_q) \cdot I_q - E''_d] \quad (\text{B.40})$$

Aplicando a regra trapezoidal implícita a equação B.40 teremos :

$$E''_{d(t_1)} - E''_{d(t_o)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{1}{T''_{qo}} \cdot (E'_{d(t_1)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_1)} - E''_{d(t_1)}) + \frac{1}{T''_{qo}} \cdot (E'_{d(t_o)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_o)} - E''_{d(t_o)} + (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_o)}) \right] \quad (\text{B.41})$$

ou

$$E''_{d(t_1)} = E''_{d(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo}} \cdot [E'_{d(t_1)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_1)} - E''_{d(t_1)}] + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo}} \cdot [E'_{d(t_o)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_o)} - E''_{d(t_o)}] \quad (\text{B.41})$$

Reescrevendo a equação B.41 de maneira a explicitar $E''_{d(t1)}$ teremos :

$$E''_{d(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \cdot \left[E'_{d(t_1)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_1)} \right] + \frac{2 \cdot T''_{qo}}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \cdot E''_{d(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \cdot \left[E'_{d(t_o)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_o)} - E''_{d(t_o)} \right] \quad (B.42)$$

Considerando a equivalência

$$\frac{2 \cdot T''_{qo}}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \cdot E''_{d(t_o)} = \left(\frac{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} - \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \right) \cdot E''_{d(t_o)} \quad (B.43)$$

podemos escrever

$$E''_{d(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \cdot \left[E'_{d(t_1)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_1)} \right] + E''_{d(t_o)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \cdot \left[E'_{d(t_o)} - 2 \cdot E''_{d(t_o)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_o)} \right] \quad (B.44)$$

Definindo os termos

$$aa_q = \frac{\Delta t}{2 \cdot T''_{qo} + \Delta t} \quad (B.45)$$

$$FF_d = E''_{d(t_o)} + aa_q \cdot \left[E'_{d(t_o)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_o)} - 2 \cdot E''_{d(t_o)} \right] \quad (B.46)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow E''_{d(t_1)} = aa_q \cdot \left[E'_{d(t_1)} - (x'_q - x''_q) \cdot I_{q(t_1)} \right] + FF_d \quad (B.47)$$

B.3. Equação Elétrica para o Rotor do Modelo Não-Convencional :

O modelo proposto em [5] apresenta uma equação diferencial particular para representar os fenômenos elétricos de campo da máquina síncrona. Esta equação é apresentada em B.48.

$$\bullet \dot{E} = \frac{1}{T'_{do}} \cdot [E_{fd} - E'] \quad (B.48)$$

Aplicando a regra trapezoidal implícita a equação 4.48 teremos :

$$E_{(t_1)} - E_{(t_o)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{1}{T'_{do}} \cdot (E_{fd(t_1)} - E_{(t_1)}) + \frac{1}{T'_{do}} \cdot (E_{fd(t_o)} - E_{(t_o)}) \right] \quad (B.49)$$

ou

$$E_{(t_1)} = E_{(t_0)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do}} \cdot (E_{fd(t_1)} - E_{(t_1)}) + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do}} \cdot (E_{fd(t_0)} - E_{(t_0)}) \quad (\text{B.50})$$

Reescrevendo a equação B.50 de maneira a explicitar E teremos :

$$E_{(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot E_{fd(t_1)} + \frac{2 \cdot T'_{do}}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot E_{(t_0)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot (E_{fd(t_0)} - E_{(t_0)}) \quad (\text{B.51})$$

Considerando a equivalência

$$\frac{2 \cdot T'_{do}}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot E_{(t_0)} = \left(\frac{2 \cdot T'_{do} + \Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} - \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \right) \cdot E_{(t_0)} \quad (\text{B.52})$$

podemos escrever

$$E_{(t_1)} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot E_{fd(t_1)} + E_{(t_0)} + \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \cdot (E_{fd(t_0)} - 2 \cdot E_{(t_0)}) \quad (\text{B.53})$$

Definindo os termos

$$a = \frac{\Delta t}{2 \cdot T'_{do} + \Delta t} \quad (\text{B.54})$$

$$F = E_{(t_0)} + a \cdot (E_{fd(t_0)} - 2 \cdot E_{(t_0)}) \quad (\text{B.55})$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow E_{(t_1)} = a \cdot E_{fd(t_1)} + F \quad (\text{B.56})$$

APÊNDICE C

APLICAÇÃO DA REGRA TRAPEZOIDAL AOS ELEMENTOS BASE PARA A CONSTRUÇÃO DOS CONTROLADORES

Neste apêndice são apresentados alguns dos blocos fundamentais que compõem os controladores e demais equipamentos do SEE, sendo que cada bloco representa uma função de transferência na forma saída/entrada. A associação de tais blocos definem a estrutura da maioria dos equipamentos do SEE.

A transformação das equações diferenciais dos equipamentos do SEE em equações algébricas a diferenças, através da aplicação da regra trapezoidal implícita, torna-se bastante simplificada se considerarmos tais equipamentos como uma composição de blocos básicos. Assim é possível aplicar a regra trapezoidal a cada um dos blocos básicos, na forma genérica, e então substituir as variáveis das equações algébricas a diferenças genéricas obtidas pelas variáveis específicas de cada bloco que compõe o equipamento. Um exemplo de algebrização das equações diferenciais de um equipamento do SEE será mostrado no final deste apêndice.

A seguir apresenta-se os blocos fundamentais mais comumente utilizados na composição dos equipamentos dos SEE, e a aplicação da regra trapezoidal a tais blocos de maneira a compor uma biblioteca de equações algébricas a diferenças.

C.1. Bloco de 1ª Ordem

O bloco padrão de 1ª Ordem é mostrado na figura C.1 a seguir.

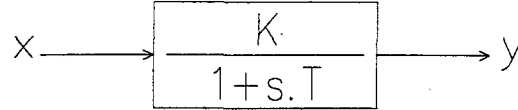


Figura C.1 - Bloco de 1ª Ordem

Onde x é a variável de entrada, y a variável de saída, K representa o ganho, s é o operador derivativo e T a constante de tempo. A equação que descreve o comportamento dinâmico deste elemento é :

$$\frac{y}{x} = \frac{K}{1 + s \cdot T} \quad (C.1)$$

ou

$$\bullet \quad \dot{y} = \frac{K}{T} \cdot x - \frac{1}{T} \cdot y \quad (C.2)$$

Aplicando a regra trapezoidal a equação C.2, teremos

$$y_{(t_1)} - y_{(t_0)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left(\frac{K}{T} \cdot x_{(t_1)} - \frac{1}{T} \cdot y_{(t_1)} + \frac{K}{T} \cdot x_{(t_0)} - \frac{1}{T} \cdot y_{(t_0)} \right) \quad (C.3)$$

ou

$$\frac{2 \cdot T}{\Delta t} \cdot y_{(t_1)} + y_{(t_1)} = K \cdot x_{(t_1)} + K \cdot x_{(t_0)} - y_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T}{\Delta t} \cdot y_{(t_0)} \quad (C.4)$$

Reescrevendo C.4 de maneira a explicitar $y_{(t1)}$ teremos

$$y_{(t_1)} = \frac{K \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_1)} + \frac{K \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T - \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot y_{(t_0)} \quad (C.5)$$

Definindo os termos

$$a = \frac{K \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \quad (C.6)$$

$$b = \frac{2 \cdot T - \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \quad (C.7)$$

$$F = a \cdot x_{(t_0)} + b \cdot y_{(t_0)} \quad (C.8)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow y_{(t_1)} = a \cdot x_{(t_1)} + F \quad (C.9)$$

A expressão C.9 é a equação algébrica a diferenças, definida no intervalo $\Delta t = t_1 - t_0$, para o *Bloco de 1ª Ordem*.

C.2. Bloco Derivativo

A função padrão que define um *Bloco Derivativo* é mostrado na figura C.2 a seguir.

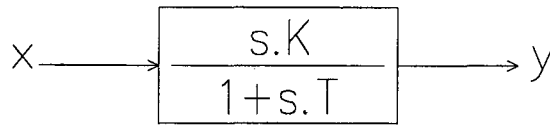


Figura C.2 - *Bloco Derivativo*

Onde x é a variável de entrada, y a variável de saída, K representa o ganho, s é o operador derivativo e T a constante de tempo. A equação que descreve o comportamento dinâmico deste elemento é :

$$\frac{y}{x} = \frac{s \cdot K}{1 + s \cdot T} \quad (C.10)$$

ou

$$\bullet \quad \dot{y} - \frac{K}{T} \cdot \dot{x} = -\frac{1}{T} \cdot y \quad (C.11)$$

Aplicando a regra trapezoidal a equação C.11, teremos

$$y_{(t_1)} - y_{(t_0)} - \frac{K}{T} \cdot (x_{(t_1)} - x_{(t_0)}) = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[-\frac{1}{T} \cdot y_{(t_1)} - \frac{1}{T} \cdot y_{(t_0)} \right] \quad (C.12)$$

ou

$$\frac{2 \cdot T}{\Delta t} \cdot y_{(t_1)} + y_{(t_1)} = \frac{2 \cdot K}{\Delta t} \cdot x_{(t_1)} - \frac{2 \cdot K}{\Delta t} \cdot x_{(t_0)} - y_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T}{\Delta t} \cdot y_{(t_0)} \quad (C.13)$$

Reescrevendo C.13 de forma a explicitar $y_{(t_1)}$ teremos

$$y_{(t_1)} = \frac{2 \cdot K}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_1)} - \frac{2 \cdot K}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T - \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot y_{(t_0)} \quad (C.14)$$

Definindo os termos

$$a = \frac{2 \cdot K}{2 \cdot T + \Delta t} \quad (C.15)$$

$$b = \frac{2 \cdot T - \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \quad (C.16)$$

$$F = -a \cdot x_{(t_o)} + b \cdot y_{(t_o)} \quad (C.17)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow y_{(t_1)} = a \cdot x_{(t_1)} + F \quad (C.18)$$

A referência [38] sugere que a seguinte equivalência seja utilizada para a representação de um *Bloco Derivativo* :

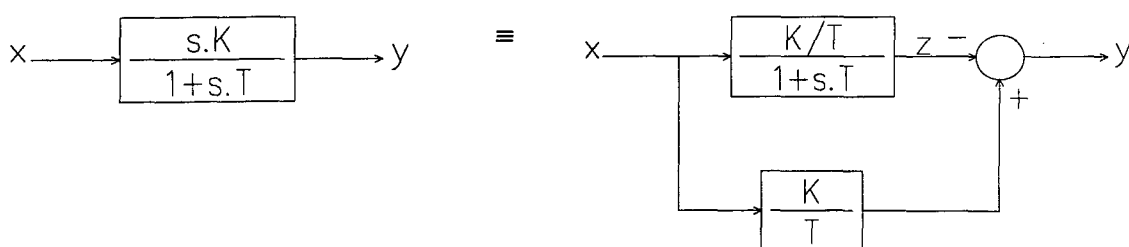


Figura C.3 - Diagrama Equivalente para o Bloco Derivativo

A equivalência sugerida evita a derivada do sinal de entrada, entretanto é necessário adicionar uma variável auxiliar z . A equação que representam o bloco principal do diagrama equivalente é :

$$\frac{z}{x} = \frac{K/T}{1 + s \cdot T} \quad (C.19)$$

reescrevendo a equação C.19 em uma forma mais conveniente teremos as seguintes equações para descrever o comportamento do *Bloco Derivativo* :

$$\bullet \quad \dot{z} = \frac{K}{T^2} \cdot x - \frac{1}{T} \cdot z \quad (C.20)$$

$$\bullet \quad y = \frac{K}{T} \cdot x - z \quad (C.21)$$

Aplicando a regra trapezoidal a equação C.20 teremos

$$z_{(t_1)} - z_{(t_0)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{K}{T^2} \cdot x_{(t_1)} - \frac{1}{T} \cdot z_{(t_1)} + \frac{K}{T^2} \cdot x_{(t_0)} - \frac{1}{T} \cdot z_{(t_0)} \right] \quad (C.22)$$

ou

$$\frac{2 \cdot T}{\Delta t} \cdot z_{(t_1)} + z_{(t_1)} = \frac{K}{T} \cdot x_{(t_1)} + \frac{K}{T} \cdot x_{(t_0)} - z_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T}{\Delta t} \cdot z_{(t_0)} \quad (C.23)$$

Reescrevendo C.23 de forma a explicitar $z_{(t_1)}$ teremos

$$z_{(t_1)} = \frac{\left(\frac{K}{T}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_1)} + \frac{\left(\frac{K}{T}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T - \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot z_{(t_0)} \quad (C.24)$$

A equação C.21 torna-se

$$y_{(t_1)} = \frac{K}{T} \cdot x_{(t_1)} - z_{(t_1)} \quad (C.25)$$

Substituindo C.24 em C.25, a expressão para $y_{(t_1)}$ assume a forma

$$y_{(t_1)} = \frac{K}{T} \cdot x_{(t_1)} - \frac{\left(\frac{K}{T}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_1)} - \frac{\left(\frac{K}{T}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot x_{(t_0)} - \frac{2 \cdot T - \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \cdot z_{(t_0)} \quad (C.26)$$

Definindo os termos

$$a' = \frac{K}{T} \quad (C.27)$$

$$a = \frac{a' \cdot \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \quad (C.28)$$

$$b = \frac{2 \cdot T - \Delta t}{2 \cdot T + \Delta t} \quad (C.29)$$

$$F = -a \cdot x_{(t_0)} - b \cdot z_{(t_0)} \quad (C.30)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow y_{(t_1)} = (a' - a) \cdot x_{(t_1)} + F \quad (C.31)$$

Manipulando algebricamente a expressão C.25 teremos

$$z_{(t_1)} = a' \cdot x_{(t_1)} - y_{(t_1)} \quad (C.32)$$

C.3. Bloco “Lead-Lag”

O bloco padrão que define o “Lead-Lag” é mostrado na figura C.4 a seguir.

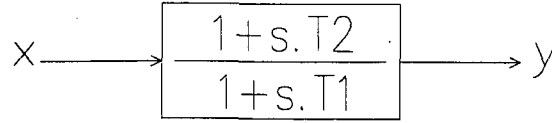


Figura C.4 - Bloco “Lead-Lag”

Onde x é a variável de entrada, y a variável de saída, s é o operador derivativo e T_1 e T_2 as constantes de tempo. A equação que descreve o comportamento dinâmico deste elemento é :

$$\frac{y}{x} = \frac{1 + s \cdot T_2}{1 + s \cdot T_1} \quad (C.33)$$

ou

$$\bullet \quad y - \frac{T_2}{T_1} \cdot \dot{x} = \frac{1}{T_1} \cdot x - \frac{1}{T_1} \cdot y \quad (C.34)$$

Aplicando a regra trapezoidal a equação C.34, teremos

$$y_{(t_1)} - y_{(t_0)} - \frac{T_2}{T_1} \cdot (x_{(t_1)} - x_{(t_0)}) = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\frac{1}{T_1} \cdot x_{(t_1)} - \frac{1}{T_1} \cdot y_{(t_1)} + \frac{1}{T_1} \cdot x_{(t_0)} - \frac{1}{T_1} \cdot y_{(t_0)} \right] \quad (C.35)$$

ou

$$\frac{2 \cdot T_1}{\Delta t} \cdot y_{(t_1)} + y_{(t_1)} = x_{(t_1)} + x_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T_2}{\Delta t} \cdot x_{(t_1)} - \frac{2 \cdot T_2}{\Delta t} \cdot x_{(t_0)} - y_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T_1}{\Delta t} \cdot y_{(t_0)} \quad (C.36)$$

Reescrevendo C.36 de forma a explicitar $y_{(t_1)}$ teremos

$$y_{(t_1)} = \frac{2 \cdot T_2 + \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot x_{(t_1)} - \frac{2 \cdot T_2 - \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot x_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T_1 - \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot y_{(t_0)} \quad (C.37)$$

Definindo os termos

$$a = \frac{2 \cdot T_2 + \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \quad (C.38)$$

$$b = \frac{2 \cdot T_2 - \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \quad (C.39)$$

$$c = \frac{2 \cdot T_1 - \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \quad (C.40)$$

$$F = -b \cdot x_{(t_o)} + c \cdot y_{(t_o)} \quad (C.41)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow y_{(t_1)} = a \cdot x_{(t_1)} + F \quad (C.42)$$

A referência [38] sugere que a seguinte equivalência seja utilizada para a representação do Bloco “Lead-Lag” :

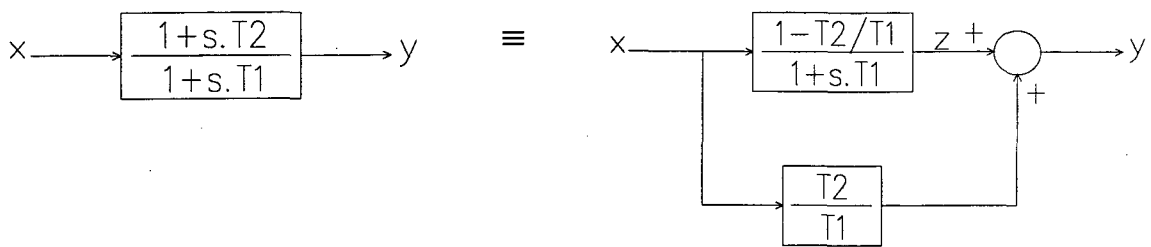


Figura C.5 - Diagrama Equivalente para o Bloco “Lead-Lag”

A equivalência sugerida evita a derivada do sinal de entrada, entretanto é necessário adicionar uma variável auxiliar z . A equação que representa o elemento principal do diagrama é :

$$\frac{z}{x} = \frac{1 - \frac{T_2}{T_1}}{1 + s \cdot T_1} \quad (C.43)$$

reescrevendo a equação C.43 em uma forma mais conveniente teremos as seguintes equações para descrever o comportamento do Bloco “Lead-Lag” :

$$\bullet \quad \dot{z} = \left(\frac{1}{T_1} - \frac{T_2}{T_1^2} \right) \cdot x - \frac{1}{T_1} \cdot z \quad (C.44)$$

$$\bullet \quad y = \frac{T_2}{T_1} \cdot x + z \quad (C.45)$$

Aplicando a regra trapezoidal a equação C.44, teremos

$$z_{(t_1)} - z_{(t_o)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot \left[\left(\frac{1}{T_1} - \frac{T_2}{T_1^2} \right) \cdot x_{(t_1)} - \frac{1}{T_1} \cdot z_{(t_1)} + \left(\frac{1}{T_1} - \frac{T_2}{T_1^2} \right) \cdot x_{(t_o)} - \frac{1}{T_1} \cdot z_{(t_o)} \right] \quad (C.46)$$

ou

$$\frac{2 \cdot T_1}{\Delta t} \cdot z_{(t_1)} + z_{(t_1)} = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot x_{(t_1)} + \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot x_{(t_0)} - z_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T_1}{\Delta t} \cdot z_{(t_0)} \quad (C.47)$$

Reescrevendo C.47 de forma a explicitar $z(t_1)$ teremos

$$z_{(t_1)} = \frac{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot x_{(t_1)} + \frac{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot x_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T_1 - \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot z_{(t_0)} \quad (C.48)$$

A equação C.45 torna-se

$$y_{(t_1)} = \frac{T_2}{T_1} \cdot x_{(t_1)} + z_{(t_1)} \quad (C.49)$$

Substituindo C.48 em C.49, a expressão para $y(t_1)$ assume a forma

$$y_{(t_1)} = \frac{T_2}{T_1} \cdot x_{(t_1)} + \frac{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot x_{(t_1)} + \frac{\left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \cdot \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot x_{(t_0)} + \frac{2 \cdot T_1 - \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \cdot z_{(t_0)} \quad (C.50)$$

Definindo os termos

$$a' = \frac{T_2}{T_1} \quad (C.51)$$

$$a = \frac{(1 - a') \cdot \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \quad (C.52)$$

$$b = \frac{2 \cdot T_1 - \Delta t}{2 \cdot T_1 + \Delta t} \quad (C.53)$$

$$F = a \cdot x_{(t_0)} + b \cdot z_{(t_0)} \quad (C.54)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow y_{(t_1)} = (a' + a) \cdot x_{(t_1)} + F \quad (C.55)$$

Manipulando algebricamente a expressão C.49 teremos

$$z_{(t_1)} = -a' \cdot x_{(t_1)} + y_{(t_1)} \quad (C.56)$$

C.4. Bloco Integrador

O bloco padrão que define um *Integrador* é mostrado na figura C.6 a seguir.

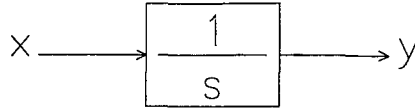


Figura C.6 - *Bloco Integrador*

Onde x é a variável de entrada, y a variável de saída e s é o operador derivativo. A equação que descreve o comportamento dinâmico deste elemento é :

$$\frac{y}{x} = \frac{1}{s} \quad (C.57)$$

ou

$$\bullet \dot{y} = x \quad (C.58)$$

Aplicando a regra trapezoidal a equação C.58, teremos

$$y_{(t_1)} - y_{(t_0)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot [x_{(t_1)} + x_{(t_0)}] \quad (C.59)$$

Reescrevendo C.59 de forma a explicitar $y_{(t1)}$ teremos

$$y_{(t_1)} = \frac{\Delta t}{2} \cdot x_{(t_1)} + \frac{\Delta t}{2} \cdot x_{(t_0)} + y_{(t_0)} \quad (C.60)$$

Definindo os termos

$$a = \frac{\Delta t}{2} \quad (C.61)$$

$$F = a \cdot x_{(t_0)} + y_{(t_0)} \quad (C.62)$$

teremos como expressão final

$$\Rightarrow y_{(t_1)} = a \cdot x_{(t_1)} + F \quad (C.63)$$

C.5. Bloco Limitador Estático (“*Windup Limiter*”)

A figura que representa um *Bloco Limitador Estático* é mostrada a seguir.

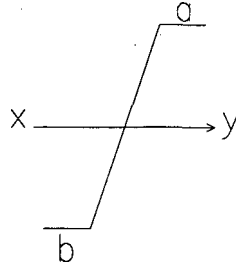


Figura C.7 - *Bloco Limitador Estático*

Onde x é a variável de entrada, y a variável de saída e a e b são, respectivamente, os limites superior e inferior. Os limitadores do tipo estático são representados pela seguinte expressão :

$$y_{(t)} = \begin{cases} x_{(t)} & \Rightarrow b < x_{(t)} < a \\ a & \Rightarrow x_{(t)} > a \\ b & \Rightarrow x_{(t)} < b \end{cases} \quad (C.64)$$

C.6. Bloco Limitador Dinâmico (“Non-Windup Limiter”)

A figura que representa um *Bloco Limitador Dinâmico* é mostrada a seguir.

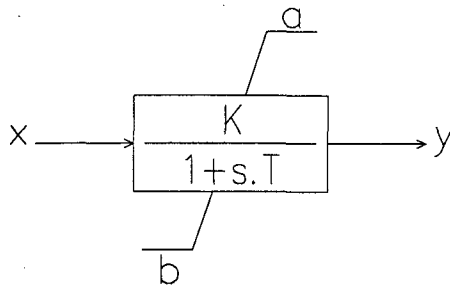


Figura C.8 - *Bloco Limitador Dinâmico*

Os limitadores do tipo dinâmico geralmente são associados a um *Bloco de 1ª Ordem*, exemplificado pela figura acima, ou a um *Bloco Integrador* puro. As equações que regem o seu comportamento são apresentadas abaixo :

$$f = \frac{K \cdot x - y}{T} \quad \text{se} \quad \begin{cases} y = a \\ y = b \end{cases} \quad \text{e} \quad \begin{cases} f > 0 \\ f < 0 \end{cases} \quad \text{então} \quad \dot{y} = 0 \quad (C.65)$$

$$\dot{y} = \frac{K \cdot x - y}{T} \quad (C.66)$$

$$\text{obs : } \begin{array}{ll} f > 0 & K \cdot x > y \\ f < 0 & K \cdot x < y \end{array} \quad (\text{C.67})$$

C.7. Exemplo : Algebrização das Equações Diferenciais do Modelo de Regulador de Tensão IEEE ST-1

A seguir será mostrado como a utilização das equações genéricas, definidas para cada bloco padrão, auxiliam na algebrização do conjunto de equações diferenciais de um elemento do SEE, tomando-se como exemplo o Regulador de Tensão IEEE ST-1 (ver Apêndice A - item A.1.2.2). O modelo que representa o regulador de tensão é composto pela associação de vários dos blocos básicos apresentados anteriormente. A figura C.9 apresenta o modelo de regulador de tensão utilizado como exemplo.

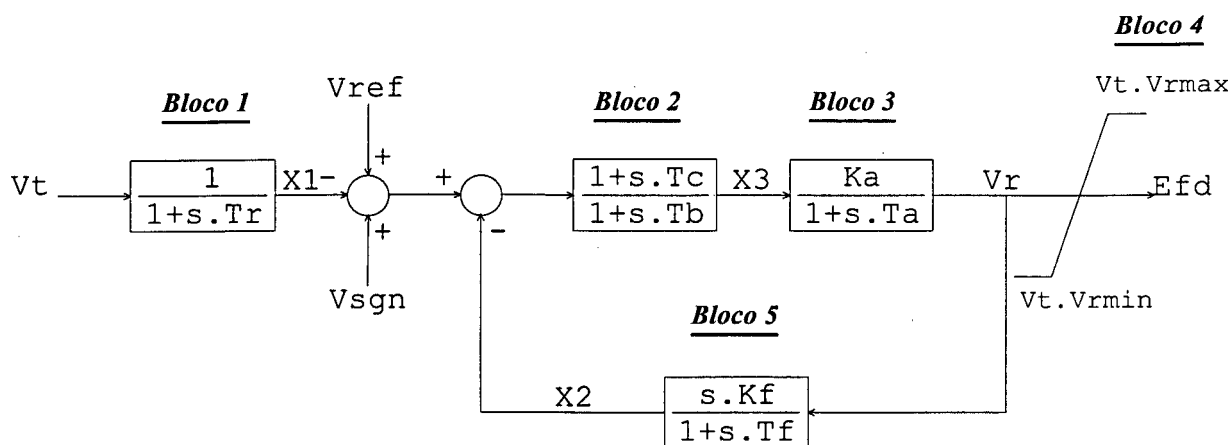


Figura C.9 - Modelo do Regulador de Tensão IEEE ST-1

A transformação das equações diferenciais em equações algébricas a diferenças é feita tomando-se cada bloco básico que compõe o modelo individualmente, como será exemplificado a seguir :

C.7.1. Bloco 1 (*Bloco de 1ª Ordem*)

O Bloco 1 do modelo de regulador de tensão é um *Bloco de 1ª Ordem* (item C.1), mostrado isoladamente na figura a seguir.

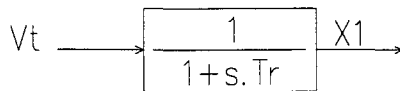


Figura C.10 - Bloco 1

Comparando o bloco padrão de *1ª Ordem* (figura C.1) com o Bloco 1 (figura C.10) podemos identificar as seguintes equivalências :

- Ganho : $K_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv I_{(\text{Bloco 1})}$
- Constante de Tempo : $T_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv T_r_{(\text{Bloco 1})}$
- Variável de Entrada : $x_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv V_t_{(\text{Bloco 1})}$
- Variável de Saída : $y_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv X1_{(\text{Bloco 1})}$

Substituindo-se os termos equivalentes, apresentados acima, na equação diferencial genérica do bloco padrão de *1ª Ordem* (equação C.2) obtém-se a equação diferencial para o Bloco 1 do modelo de regulador de tensão exemplo. Este procedimento é mostrado a seguir.

$$\dot{y} = \frac{K}{T} \cdot x - \frac{1}{T} \cdot y_{(\text{Bloco Padrão})} \Rightarrow \dot{X}_1 = \frac{1}{T_r} \cdot V_t - \frac{1}{T_r} \cdot X1_{(\text{Bloco 1})} \quad (\text{C.68})$$

O mesmo procedimento pode ser adotado para as demais equações genéricas do bloco padrão de *1ª Ordem* (equações C.6, C.7, C.8 e C.9) obtendo-se a equação algébrica a diferenças para o Bloco 1 do modelo de regulador de tensão adotado como exemplo. A forma final da equação algébrica a diferenças do Bloco 1 é apresentada a seguir.

$$\Rightarrow X1_{(t_i)} = a_{x1} \cdot V_{t(t_i)} + F_{x1} \quad (\text{C.69})$$

onde

$$a_{x1} = \frac{\Delta t}{2 \cdot T_r + \Delta t}; \quad b_{x1} = \frac{2 \cdot T_r - \Delta t}{2 \cdot T_r + \Delta t} \quad e$$

$$F_{x1} = a_{x1} \cdot V_{t(t_o)} + b_{x1} \cdot X1_{(t_o)}$$

Assim, a adoção de equações genéricas para os blocos padrões facilita bastante o trabalho de transformação das equações diferenciais dos elementos do SEE em equações algébricas a diferenças.

Procedimentos semelhantes são adotados para todos os demais blocos do regulador de tensão utilizado como exemplo.

C.7.2. Bloco 2 (*Bloco “Lead-Lag”*)

O Bloco 2 do modelo de regulador de tensão é um *Bloco “Lead-Lag”* (item C.3), mostrado isoladamente na figura a seguir.

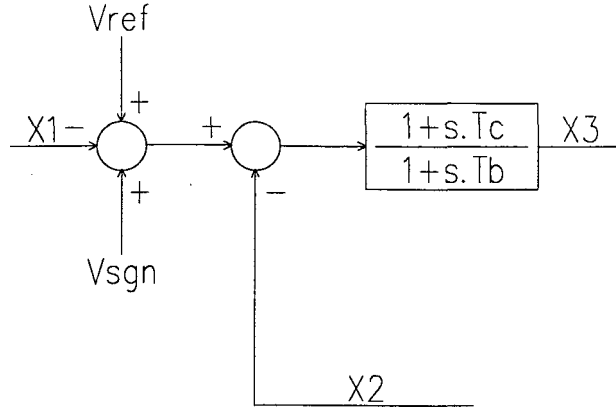


Figura C.11 - Bloco 2

Os termos equivalentes entre o Bloco 2 e o *Bloco “Lead-Lag”* padrão são :

- Constante de Tempo 1 : $T1_{(Bloco\ Padr\tilde{o})} \equiv T_b_{(Bloco\ 2)}$
- Constante de Tempo 2 : $T2_{(Bloco\ Padr\tilde{o})} \equiv T_c_{(Bloco\ 2)}$
- Variável de Entrada : $x_{(Bloco\ Padr\tilde{o})} \equiv V_{ref} - X1 + V_{sgn} - X2_{(Bloco\ 2)}$
- Variável de Saída : $y_{(Bloco\ Padr\tilde{o})} \equiv X3_{(Bloco\ 2)}$

Substituindo-se os termos equivalentes nas equações genéricas, auxiliar e diferencial, para o *Bloco “Lead-Lag”* padrão (equações C.44 e C.45) obtém-se :

$$X_3 = \frac{T_c}{T_b} \cdot (V_{ref} + V_{sgn} - X_1 - X_2) + X'_3 \quad (C.70)$$

$$\dot{X}'_3 = \left(\frac{1}{T_b} - \frac{T_c}{T_b^2} \right) \cdot (V_{ref} + V_{sgn} - X_1 - X_2) - \frac{1}{T_b} \cdot X'_3 \quad (C.71)$$

Adotando o mesmo procedimento para as demais equações genéricas do *Bloco “Lead-Lag”* padrão (equações C.51, C.52, C.53, C.54, C.55 e C.56) obtém-se a equação algébrica a diferenças e demais equações auxiliares para o Bloco 2, sendo estas apresentadas a seguir.

$$\Rightarrow X_{3(t_i)} = (a'_{x3} + a_{x3}) \cdot (V_{ref} + V_{sgn(t_i)} - X_{1(t_i)} - X_{2(t_i)}) + F_{x3} \quad (C.72)$$

$$X'_{3(t_i)} = -a'_{x3} \cdot \left(V_{ref} + V_{sgn(t_i)} - X_{1(t_i)} - X_{2(t_i)} \right) + X_{3(t_i)} \quad (C.73)$$

onde

$$a'_{x3} = \frac{T_c}{T_b}; \quad a_{x3} = \frac{(1 - a'_{x3}) \cdot \Delta t}{2 \cdot T_b + \Delta t}; \quad b_{x3} = \frac{2 \cdot T_b - \Delta t}{2 \cdot T_b + \Delta t} \quad e$$

$$F_{x3} = a_{x3} \cdot \left(V_{ref} + V_{sgn(t_o)} - X_{1(t_o)} - X_{2(t_o)} \right) + b_{x3} \cdot X'_{3(t_o)}$$

C.7.3. Bloco 3 (*Bloco de 1ª Ordem*)

O Bloco 3 do modelo de regulador de tensão é um *Bloco de 1ª Ordem* (item C.1), mostrado isoladamente na figura a seguir.

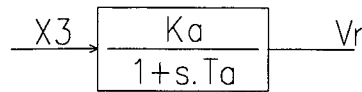


Figura C.12 - Bloco 3

Os termos equivalentes entre o Bloco 3 e o *Bloco de 1ª Ordem* padrão são :

- Ganho : $K_{(Bloco\ Padrão)} \equiv K_{a\ (Bloco\ 3)}$
- Constante de Tempo : $T_{(Bloco\ Padrão)} \equiv T_{a\ (Bloco\ 3)}$
- Variável de Entrada : $x_{(Bloco\ Padrão)} \equiv X_{3\ (Bloco\ 3)}$
- Variável de Saída : $y_{(Bloco\ Padrão)} \equiv V_{r\ (Bloco\ 3)}$

Substituindo-se os termos equivalentes na equação genérica para o *Bloco de 1ª Ordem* padrão (equação C.2) obtém-se :

$$\dot{V}_r = \frac{K_a}{T_a} \cdot X_3 - \frac{1}{T_a} \cdot V_r \quad (C.74)$$

Adotando o mesmo procedimento para as demais equações genéricas do *Bloco de 1ª Ordem* padrão (equações C.6, C.7, C.8 e C.9) obtém-se a equação algébrica a diferenças para o Bloco 3, sendo esta apresentada a seguir.

$$\Rightarrow V_{r(t_i)} = a_{Vr} \cdot X_{3(t_i)} + F_{Vr} \quad (C.75)$$

onde

$$a_{V_r} = \frac{K_a \cdot \Delta t}{2 \cdot T_a + \Delta t}; \quad b_{V_r} = \frac{2 \cdot T_a - \Delta t}{2 \cdot T_a + \Delta t} \quad e$$

$$F_{V_r} = a_{V_r} \cdot X_{3(t_o)} + b_{V_r} \cdot V_{r(t_o)}$$

C.7.4. Bloco 4 (*Bloco Limitador Estático*)

O Bloco 4 do modelo de regulador de tensão é um *Bloco Limitador Estático* (item C.5), mostrado isoladamente na figura a seguir.

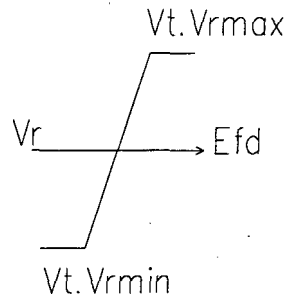


Figura C.13 - Bloco 4

Os termos equivalentes entre o Bloco 4 e o *Bloco Limitador Estático* padrão são :

- Limite Superior : $a_{\text{(Bloco Padrão)}} \equiv V_t \cdot V_{r\text{máx}} \text{ (Bloco 4)}$
- Limite Inferior : $b_{\text{(Bloco Padrão)}} \equiv V_t \cdot V_{r\text{min}} \text{ (Bloco 4)}$
- Variável de Entrada : $x_{\text{(Bloco Padrão)}} \equiv V_r \text{ (Bloco 4)}$
- Variável de Saída : $y_{\text{(Bloco Padrão)}} \equiv E_{fd} \text{ (Bloco 4)}$

Substituindo-se os termos equivalentes na equação genérica para o *Bloco Limitador Estático* padrão (equação C.64) obtém-se :

$$\Rightarrow E_{fd} = \begin{cases} V_t \cdot V_{r\text{max}} \Rightarrow V_r > V_t \cdot V_{r\text{max}} \\ V_r \Rightarrow V_t \cdot V_{r\text{min}} < V_r < V_t \cdot V_{r\text{max}} \\ V_t \cdot V_{r\text{min}} \Rightarrow V_r < V_t \cdot V_{r\text{min}} \end{cases} \quad (\text{C.76})$$

C.7.5. Bloco 5 (*Bloco Derivador*)

O Bloco 5 do modelo de regulador de tensão é um *Bloco Derivador* (item C.2), mostrado isoladamente na figura a seguir.

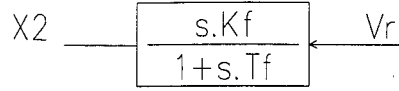


Figura C.14 - Bloco 5

Os termos equivalentes entre o Bloco 5 e o *Bloco Derivador* padrão são :

- Ganho : $K_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv K_{f(\text{Bloco 5})}$
- Constante de Tempo : $T_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv T_{f(\text{Bloco 5})}$
- Variável de Entrada : $x_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv V_{r(\text{Bloco 5})}$
- Variável de Saída : $y_{(\text{Bloco Padrão})} \equiv X_{2(\text{Bloco 5})}$

Substituindo-se os termos equivalentes nas equações genéricas, auxiliar e diferencial, para o *Bloco Derivador* padrão (equações C.20 e C.21) obtém-se :

$$X_2 = \frac{K_f}{T_f} \cdot V_r - X'_2 \quad (\text{C.77})$$

$$\dot{X}'_2 = \frac{K_f}{T_f^2} \cdot V_r - \frac{1}{T_f} \cdot X'_2 \quad (\text{C.78})$$

Adotando o mesmo procedimento para as demais equações genéricas do *Bloco Derivador* padrão (equações C.27, C.28, C.29, C.30, C.31 e C.32) obtém-se a equação algébrica a diferenças e demais equações auxiliares para o Bloco 5, sendo estas apresentadas a seguir.

$$\Rightarrow X_{2(t_1)} = (a'_{x2} - a_{x2}) \cdot V_{r(t_1)} + F_{x2} \quad (\text{C.79})$$

$$X'_{2(t_1)} = a'_{x2} \cdot V_{r(t_1)} - X_{2(t_1)} \quad (\text{C.80})$$

onde

$$a'_{x2} = \frac{K_f}{T_f}; \quad a_{x2} = \frac{a'_{x2} \cdot \Delta t}{2 \cdot T_f + \Delta t}; \quad b_{x2} = \frac{2 \cdot T_f - \Delta t}{2 \cdot T_f + \Delta t} \quad e$$

$$F_{x2} = -a_{x2} \cdot V_{r(t_0)} - b_{x2} \cdot X'_{2(t_0)}$$

C.7.6. Conjunto de Equações Algébricas a Diferenças

O conjunto de equações algébricas a diferenças para o regulador de tensão, adotado como exemplo, podem agora ser escritas :

$$X_{1(t_1)} = a_{x1} \cdot V_{t(t_1)} + F_{x1} \quad (C.81)$$

$$X_{3(t_1)} = (a'_{x3} + a_{x3}) \cdot \left(V_{ref} + V_{\text{sgn}(t_1)} - X_{1(t_1)} - X_{2(t_1)} \right) + F_{x3} \quad (C.82)$$

$$V_{r(t_1)} = a_{vr} \cdot X_{3(t_1)} + F_{vr} \quad (C.83)$$

$$X_{2(t_1)} = (a'_{x2} - a_{x2}) \cdot V_{r(t_1)} + F_{x2} \quad (C.84)$$

$$E_{fd} = \begin{cases} V_t \cdot V_{rmax} \Rightarrow V_r > V_t \cdot V_{rmax} \\ V_r \Rightarrow V_t \cdot V_{rmin} < V_r < V_t \cdot V_{rmax} \\ V_t \cdot V_{rmin} \Rightarrow V_r < V_t \cdot V_{rmin} \end{cases} \quad (C.85)$$

O exemplo adotado neste apêndice deixa suficientemente claro que a utilização das equações algébricas a diferenças generalizadas, encontradas para cada um dos blocos padrão, facilita muito o esforço de algebrização das equações diferenciais dos controladores e demais elementos do SEE.

Glossário de Símbolos

Símbolos de utilização geral

- X_1, X'_1 : variável de estado e auxiliar intermediárias para os equipamentos;
 X_2, X'_2 : variável de estado e auxiliar intermediárias para os equipamentos;
 X_3, X'_3 : variável de estado e auxiliar intermediárias para os equipamentos;
 X_4, X'_4 : variável de estado e auxiliar intermediárias para os equipamentos;
 X_5, X'_5 : variável de estado e auxiliar intermediárias para os equipamentos;
 X_6 : variável de estado intermediária para os equipamentos;
 X_7 : variável de estado intermediária para os equipamentos;
 X_8, X'_8 : variável de estado e auxiliar intermediárias para os equipamentos;

Modelagem das Máquinas Síncronas

- d, q : representação dos eixos direto e em quadratura da máquina síncrona;
 re, im : representação dos eixos real e imaginário do sistema de referência síncrono;
 w : velocidade angular da máquina síncrona;
 δ : ângulo absoluto do eixo em quadratura da máquina síncrona;
 $\dot{\lambda}_d, \dot{\lambda}_q$: tensões variacionais do estator segundo os eixos d e q ;
 T : operador ortogonal de transformação de coordenadas $re-im \leftrightarrow d-q$
 w_r : velocidade angular síncrona da máquina síncrona;
 H : constante de inércia da máquina síncrona;
 P_m : potência mecânica da máquina síncrona;
 P_e : potência elétrica ativa gerada pela máquina síncrona;
 D : coeficiente de amortecimento proporcional ao desvio de velocidade;

r	: resistência do enrolamento da armadura;
x_d, x_q	: reatâncias síncronas de eixos d e q da máquina síncrona;
x'_d, x'_q	: reatâncias transitórias de eixos d e q da máquina síncrona;
x''_d, x''_q	: reatâncias subtransitórias de eixos d e q da máquina síncrona;
T'_{do}, T'_{qo}	: constantes de tempo transitórias de eixos d e q da máquina síncrona;
T''_{do}, T''_{qo}	: constantes de tempo subtransitórias de eixos d e q da máquina síncrona;
V_d, V_q	: tensão terminal projetada nos eixos d e q da máquina síncrona;
I_d, I_q	: corrente de armadura projetada nos eixos d e q da máquina síncrona;
E'_d, E'_q	: tensão transitória projetada nos eixos d e q da máquina síncrona;
E''_d, E''_q	: tensão subtransitória projetada nos eixos d e q da máquina síncrona;
E	: tensão do modelo simplificado de máquinas síncronas;
E_{fd}	: tensão de campo da máquina síncrona;
\bar{V}	: tensão complexa terminal da máquina síncrona projetada nos eixos $re-im$;
\bar{E}	: tensão complexa da máquina síncrona projetada nos eixos $re-im$;
\bar{E}'	: tensão complexa transitória da máquina síncrona projetada nos eixos $re-im$;
\bar{E}''	: tensão complexa subtransitória da máquina síncrona projetada nos eixos $re-im$;
\bar{I}	: corrente de armadura da máquina síncrona projetada nos eixos $re-im$;

Modelagem dos Reguladores de Tensão

K_e, T_e	: ganho e constante de tempo da excitatriz;
K_f, T_f	: ganho e constante de tempo da malha de estabilização;
K_a, T_a	: ganho e constante de tempo do amplificador;
T_r	: constante de tempo do transdutor de tensão;
V_r	: sinal de tensão na saída do amplificador;
$V_{r\max}, V_{r\min}$: limites máximo e mínimo do sinal de tensão na saída do amplificador;
V_{SE}	: sinal de tensão devido ao efeito de saturação da excitatriz;
V_{ref}	: tensão de referência do regulador de tensão;

- V_{sgn} : entrada para o sinal adicional estabilizador aplicado ao regulador de tensão;
- V_t : módulo da tensão terminal da máquina síncrona;
- SE : função que define a saturação da excitatriz;
- $SE_{máx}$: saturação máxima da excitatriz;
- $SE_{0.75}$: saturação da excitatriz à 75% da saída máxima do regulador de tensão;
- $E_{fdmáx}$: valor de saída máximo do regulador de tensão;
- K_1, K_2 : constantes que definem a função de saturação da excitatriz;
- T_a, T_b : constantes de tempo associadas ao “lead-lag” de compensação de fase;

Modelagem dos Estabilizadores de Sistemas de Potência

- P_e, P_a : sinais de potência elétrica e acelerante de entrada no estabilizador de 1º ordem;
- w, f : sinais de velocidade e frequência de entrada no estabilizador de 2º ordem;
- K : ganho do estabilizador;
- T_w : constante de tempo do “washout” do ESP;
- T_1, T_2 : constantes de tempo do 1º “lead-lag” do ESP de 1º e 2º ordem;
- T_3, T_4 : constantes de tempo do 2º “lead-lag” do ESP de 2º ordem;
- V_{sgn} : sinal de saída do estabilizador;
- $V_{máx}, V_{mín}$: limites máximo e mínimo do sinal de saída do estabilizador;

Modelagem dos Reguladores de Velocidade

- K : ganho efetivo total dos modelos gerais de reguladores de velocidade;
- T_1, T_2, T_3 : constantes de tempo dos modelos gerais de reguladores de velocidade;
- P_o : referência de carga do regulador de velocidade;
- P_{gv} : potência de saída na válvula ou posição efetiva da válvula;
- P_{up}, P_{dn} : limites máximo e mínimo da taxa de variação da potência na válvula;
- $P_{máx}, P_{mín}$: limites máximo e mínimo na potência de saída na válvula;
- T_g : constante de tempo do servomotor de acionamento da válvula;
- R_t : ganho transitório do regulador de velocidade;

T_r	: constante de tempo do “dashpot” do regulador de velocidade;
R_p	: ganho permanente do regulador de velocidade;
T_p	: constante de tempo da válvula piloto e do servomotor;
Q	: ganho do servomotor;
K_p, K_i, K_d	: parâmetros do controle <i>PID</i> ;
T_a	: constante de tempo do servo piloto;
T_c, T_d	: constantes de tempo do servomotor;
T	: constante de tempo adicional para o elemento derivativo do controlador <i>PID</i> ;
R	: regulação da unidade de geração;

Modelagem das Turbinas

HP	: alta pressão;
LP	: baixa pressão;
IP	: média pressão;
$K_1...K_8$: ganhos associados a contribuição dos estágios de HP, LP e IP da turbina;
$T_4...T_7$: constantes de tempo associadas aos atrasos nas tubulações da turbina;
P_{m1}, P_{m2}	: parcelas da potência mecânica total fornecida pela turbina;
T_{ch}	: constante de tempo relativa ao atraso do vapor;
T_{rh}	: constante de tempo relativa ao atraso de vapor no superaquecedor;
T_{rh1}, T_{rh2}	: constante de tempo relativa ao atraso de vapor no superaquecedor;
T_{co}	: constante de tempo relativa ao atraso de vapor no “crossover”;
F_{hp}	: fração da potência mecânica desenvolvida no estágio de alta pressão;
F_{vhp}	: fração da potência mecânica desenvolvida no estágio de alta pressão;
F_{ip}	: fração da potência mecânica desenvolvida no estágio de média pressão;
F_{lp}	: fração da potência mecânica desenvolvida no estágio de baixa pressão;
T_w	: constante de tempo da água ou tempo de partida nominal da água;
D	: coeficiente de amortecimento da turbina;
h	: altura de água que representa a pressão na admissão da turbina;
q	: vazão de água na turbina;

q_{nl}	: vazão de água na turbina sem carga mecânica;
A_t	: fator de proporcionalidade ou ganho da turbina hidráulica;
T_g	: constante de tempo associada a turbina a gás;
P_{max}	: limite máximo da potência de saída da turbina a gás;
aux	: efeito de variação da tensão e frequência na potência de saída da turbina a gás;

Modelagem das Caldeiras

m	: fluxo de vapor no superaquecedor;
K	: perda nas tubulações do superaquecedor até a admissão na turbina;
P_D	: pressão no tambor da caldeira;
P_t	: pressão disponível na admissão da turbina;
CV	: posição de abertura da válvula;
C_D	: capacidade de armazenamento de vapor no tambor;
C_{SH}	: capacidade de armazenamento de vapor no superaquecedor;
T_w	: constante de tempo associada ao atraso da transferência de calor para a água;
T_a	: constante de tempo associada ao atraso de alimentação de combustível;
T_d	: constante de tempo associada ao atraso de alimentação de combustível;
CAG	: sinal proveniente do C.A.G. ou do controle coordenado regulador-caldeira;
$X_{2a}...X_{2c}$: variáveis intermediárias da dinâmica de alimentação do combustível;
X_{3a}	: variável intermediária do controle da caldeira;
T_I, K_i	: parâmetros do controle <i>PI</i> da caldeira;
T_r	: constante de tempo associada ao controle da caldeira;
P_{ref}	: pressão de referência da caldeira;

Modelagem do Reator Nuclear

K_f	: não descrito na referência [62];
K_n	: “core neutronics & heat transfer”;
T_b	: “core heat transfer lag TC”;

T_n	: “core neutronics effective TC”;
T_a	: “core heat transfer lag TC”;
K_d	: “cold leg feedback gain”;
T_d	: “cold leg feedback lead TC”;
T_h	: “cold leg feedback lead TC”;
K_c	: “cold leg feedback gain”;
T_c	: “cold leg feedback lead TC”;
K_r	: “pressure control gain”;
T_{cl}	: “UTSG cold leg lag TC”;
T_{hl}	: “UTSG hot leg lag TC”;
K_{hc}	: “hot leg to cold leg gain”;
K_s	: não descrito na referência [62];
K_{hs}	: “hot leg steam gain”;
T_s	: “steam pressure drop lag TC”;
K_w	: “steam flow feedback gain”;
K_{fb}	: “steam pressure feedback gain”;
P_{ref}	: pressão de referência do reator nuclear;
CV	: posição de abertura da válvula;

Modelagem da Rede Elétrica

i, j	: barras genéricas da rede elétrica;
R, X	: resistência e reatância das linhas de transmissão ou dos transformadores;
B	: susceptância em derivação das linhas de transmissão;
Y_{ij}	: admitância entre as barras genéricas i e j ;
Z_{ij}	: impedância entre as barras genéricas i e j ;
Y_i, Y_j	: admitância em derivação nas barras genéricas i e j ;
a	: tap do transformador;
a_0, a_n	: tap inicial e tap final do transformador;
P_{tap}	: passo de incremento do tap;

- tap_o : tap inicial do mecanismo de variação automática de taps;
- tap_n : tap final do mecanismo de variação automática de taps;
- $tap_{m\acute{a}x}$: limite máximo do tap do transformador;
- $tap_{m\acute{i}n}$: limite mínimo do tap do transformador;
- T_d : retardo do temporizador do mecanismo de variação automática de taps;
- e : desvio de tensão abaixo do qual o transformador LTC não atua;
- I_c : vetor das injeções nodais das correntes de compensação;
- I_{ci}, I_{cj} : injeções de correntes de compensação nas barras genéricas i e j ;
- V_i, V_j : tensões nas barras genéricas i e j ;
- ΔY : matriz admitância de correções a matriz admitância nodal;
- $\Delta Y_{ii}, \Delta Y_{jj}$: admitância de correção aos elementos ii e jj da matriz admitância nodal;
- $\Delta Y_{ij}, \Delta Y_{ji}$: admitância de correção ao elemento ij e ji da matriz admitância nodal;

Modelagem das Cargas Estáticas

- a_1, b_1, c_1 : coeficientes da parcela ativa da carga correspondente ao modelo polinomial;
- a_2, b_2, c_2 : coeficientes da parcela reativa da carga correspondente ao modelo polinomial;
- d_1, d_2 : coeficientes associados a variação da carga com a frequência;
- f, f_o : frequência de operação da barra e frequência de referência;
- P, Q : potência ativa e reativa atual da carga;
- P_o, Q_o : potência ativa e reativa nominal da carga;
- np, nq : coeficientes associados ao modelo exponencial de carga;
- \bar{I} : corrente injetada na barra referente ao modelo polinomial de carga;
- $\bar{I}_p, \bar{I}_1, \bar{I}_z$: parcelas da corrente injetada na barra referente ao modelo polinomial de carga;
- \bar{I}_c : injeção de corrente de compensação devido ao modelo de carga adotado;
- \bar{V} : tensão na barra da carga;
- \bar{V}_o : tensão inicial na barra da carga;

- \bar{I}_o : injeção de corrente considerando a carga como 100% impedância constante;
 \bar{y}_o : admitância equivalente da carga como 100% impedância constante;

Modelagem do Motor de Indução

- S : escorregamento do rotor do motor de indução;
 H : constante de inércia do conjunto motor de indução - carga mecânica;
 T_m : torque mecânico do motor de indução;
 T_e : torque elétrico do motor de indução;
 a, b, c : coeficientes associados a curva de carga do motor de indução;
 E'_r, E'_m : componentes real e imaginária da tensão transitória do motor de indução;
 I_r, I_m : componentes real e imaginária da corrente de estator do motor de indução;
 T'_o : constante de tempo do motor de indução a circuito aberto;
 x_o : reatância própria do enrolamento do estator do motor de indução;
 x' : reatância transitória do enrolamento do estator do motor de indução;

Modelagem da Carga (Modelo Dinâmico)

- $P_t(V)$: polinômio que define a característica transitória da parte ativa da carga;
 $P_s(V)$: polinômio que define a característica estática da parte ativa da carga;
 c_0, c_1, c_2 : coeficientes associados ao polinômio $P_t(V)$;
 d_0, d_1, d_2 : coeficientes associados ao polinômio $P_s(V)$;
 T_p : constante de tempo da parte ativa do modelo dinâmico de carga;
 P : potência ativa de saída do modelo dinâmico de carga;
 P_o : potência ativa nominal do modelo dinâmico de carga;
 $Q_t(V)$: polinômio que define a característica transitória da parte reativa da carga;
 $Q_s(V)$: polinômio que define a característica estática da parte reativa da carga;
 e_0, e_1, e_2 : coeficientes associados ao polinômio $Q_t(V)$;
 f_0, f_1, f_2 : coeficientes associados ao polinômio $Q_s(V)$;
 T_q : constante de tempo da parte reativa do modelo dinâmico de carga;
 Q : potência reativa de saída do modelo dinâmico de carga;

Q_o : potência reativa nominal do modelo dinâmico de carga;

Modelagem da Curva de Carga

$P(t), Q(t)$: potências ativa e reativa em função do tempo;

K_1, K_2 : coeficientes que definem a reta de interpolação;

f_n, t_n : parâmetros de um ponto qualquer sobre a curva de carga;

f_{n+1}, t_{n+1} : parâmetros do ponto seguinte ao ponto (f_n, t_n) sobre a curva de carga;

P_o, Q_o : potência ativa e reativa nominal da carga;

Modelagem dos FACTS

T_1, T_2 : constantes de tempo do “lead-lag” de compensação de fase;

K, T : ganho e constante de tempo do “washout”;

V_{ref} : sinal de tensão de referência;

V_t : sinal de tensão da barra de conexão;

V_{sgn} : sinal adicional aplicado ao compensador estático de reativos;

B_l : susceptância indutiva controlada;

B_c : susceptância capacitiva fixa;

B : susceptância de saída;

$B_{máx}, B_{mín}$: limites máximo e mínimo da susceptância controlada;

T_d : constante de tempo do capacitor série controlado;

K_i, K_p : parâmetros do controle *PI* do capacitor série controlado;

X_t : sinal de entrada qualquer;

X_{ref} : sinal de referência;

X_{sgn} : sinal adicional qualquer aplicado;

Modelagem do Controle Automático de Geração

f_{med} : frequência média das barras da ilha elétrica onde há leitura de frequência;

f_o : frequência de referência do sistema;

$P_{lt1}...P_{ltn}$: fluxos de potência ativa nas linhas de transmissão de fronteira da ilha elétrica;

- $P_{intrcmb}$: fluxo de potência ativa de intercâmbio da ilha elétrica;
- P_{progr} : fluxo de potência ativa de intercâmbio programado para a ilha elétrica;
- eca : sinal de erro de controle de área da ilha elétrica;
- K_p, K_i : parâmetros do controle PI do C.A.G.
- T_d : constante de tempo associada ao controle do C.A.G.
- P_o : referência de carga dos reguladores de velocidade que pertencem ao C.A.G.;
- K_l : fator de participação da unidade de geração no CAG;
- θ : ângulo de fase do fasor tensão;
- f : frequência de operação de uma barra qualquer do SEE;
- Δf : desvio da frequência em relação a nominal;
- T : constante de tempo associada ao filtro do derivador de leitura de frequência.